

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ  
ПАПЕРОРОБНИХ І КАРТОНОРОБНИХ МАШИН:  
ПРАКТИКУМ З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів, які навчаються  
за спеціальністю «133 Галузеве машинобудування»,  
спеціалізацією «Інжиніринг, обладнання та технології  
целюлозно-паперового виробництва»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2019

Розрахунок і конструювання елементів папероробних і картоноробних машин: практикум з навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності “133 Галузеве машинобудування” спеціалізації “Інжиніринг, обладнання та технології целюлозно-паперового виробництва”:/ КПП ім. Ігоря Сікорського; уклад. І.А. Андреев, О.А. Новохат – Електронні текстові дані (1 файл: 8,4 Мбайт). – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 127 с.

*Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету (протокол №10 від « 20 » червня 2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

## **РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ПАПЕРОРОБНИХ І КАРТОНОРОБНИХ МАШИН: ПРАКТИКУМ З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

Укладачі: *Андреев Ігор Анатолійович*, канд. техн. наук, доцент

*Новохат Олег Анатолійович*, канд. техн. наук, старший викладач

Відповідальний

Редактор: *Корнієнко Ярослав Микитович*, докт. техн. наук, професор

Рецензент: *Сокольський Олександр Леонідович*, канд. техн. наук, доцент

Навчальний посібник містить завдання і приклади виконання розрахунків з надійності і довговічності устаткування хімічних виробництв. Розглянуті умови забезпечення міцності, стійкості, жорсткості, герметичності та корозійної тривкості елементів папероробних та картоноробних машин.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології целюлозно-паперового виробництва» і споріднених галузей, а також викладачів вищих спеціальних навчальних закладів.

© КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019

## Зміст

Вступ.....	5
Перелік позначень.....	6
1. Вихідні дані до розрахунку апарата.....	7
2. Практичне заняття 1. Розрахункові параметри і допустимі напруження.....	9
3. Практичне заняття 2. Розрахунок циліндричної обичайки, яка знаходиться під дією внутрішнього тиску.....	19
4. Практичне заняття 3. Розрахунок днищ і кришок, які знаходяться під дією внутрішнього тиску.....	29
5. Практичне заняття 4. Розрахунок циліндричної обичайки, яка знаходиться під дією зовнішнього тиску.....	40
6. Практичне заняття 5. Розрахунок циліндричної обичайки, яка знаходиться під спільною дією зовнішнього тиску і осьової стискуючої сили .....	45
7. Практичне заняття 6. Розрахунок конічного днища, яке навантажене зовнішнім тиском.....	49
8. Практичне заняття 7. Розрахунок еліптичного і півсферичного днищ, які навантажені зовнішнім тиском.....	54
9. Практичні заняття 8, 9. Розрахунок несучої спроможності обичайки під опорою.....	58
10. Практичні заняття 10, 11. Крайові навантаження: розрахунок крайової сили і крайового моменту. Розрахунок крайових напружень і перевірка умови міцності.....	59
11. Практичні заняття 12, 13, 14. Розрахунок валів перемішуючих пристроїв на вібростійкість, жорсткість і міцність.....	61

12. Практичні заняття 15, 16. Розрахунок товщини стінки апарата високого тиску. Розрахунок напружень, які виникають в корпусі апарата в робочих умовах.....	64
13. Практичне заняття 17. Розрахунок затворів апаратів високого тиску...	72
14. Практичні заняття 18-22. Розрахунок пресового вала з покриттям.....	81
15. Практичні заняття 23-27. Розрахунок трубчастого вала.....	92
16. Практичні заняття 28-30. Розрахунок відсмоктувального вала.....	102
<b>Додаток А. Механічні характеристики сталей.....</b>	<b>109</b>
<b>Додаток Б. Коефіцієнти міцності зварних швів.....</b>	<b>120</b>
<b>Додаток В. Сталевий листовий прокат.....</b>	<b>121</b>
<b>Додаток Г. Модуль пружності під час розтягу.....</b>	<b>124</b>
<b>Додаток Д. Номограма для розрахунку на стійкість в границях пружності циліндричних обичайок, які працюють під зовнішнім тиском.....</b>	<b>125</b>
<b>Додаток Е. Додаткові дані для розрахунку затворів апаратів високого тиску .....</b>	<b>126</b>



## **Вступ**

Дисципліна «Розрахунок і конструювання елементів папероробних і картоноробних машин» викладається на кафедрі МАХНВ КПІ ім. Ігоря Сікорського у 6 семестрі студентам, які навчаються за спеціалізацією «Інжиніринг, обладнання та технології целюлозно-паперового виробництва». Метою дисципліни є надання знань по забезпеченню міцності, стійкості, жорсткості, герметичності, корозійної тривкості і конструктивної довершеності основних елементів папероробних та картоноробних машин.

Метою практичних занять є набуття досвіду проведення розрахунків основних елементів папероробних та картоноробних машин, систематизація і закріплення лекційного матеріалу.

Теоретичні положення дисципліни викладені у навчально-методичних розробках викладачів кафедри, посилання на які подаються окремо у кожному розділі вказівок.

## ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ

- $B_I$  – коефіцієнт;
- $b$  – ширина плоскої прокладки, м;
- $C$  – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м;
- $C_1$  – додаток до розрахункової товщини стінки для компенсації корозії та (або) ерозії, м;
- $C_2$  – додаток до розрахункової товщини стінки для компенсації мінусового допуску, м;
- $C_3$  – додаток до розрахункової товщини стінки для компенсації стоншення стінки елементу посудини або апарата при технологічних операціях, м;
- $C_e$  – додаток до розрахункової товщини стінки для компенсації ерозії, м;
- $C_o$  – додаток до розрахункової товщини стінки, що йде на округлення до найближчої стандартної товщини листа, м;
- $D$  – внутрішній діаметр посудини (обичайки, днища), м;
- $D_I$  – внутрішній діаметр ущільнення, м;
- $D_E$  – ефективний діаметр конічного днища, м;
- $D_o$  – внутрішній діаметр нижнього штуцера, м;
- $D_R$  – розрахунковий діаметр ущільнювальної поверхні, м;
- $d_{m1}, d_{m2}$  – діаметри мішалок, м;
- $E$  – модуль пружності в умовах розтягу за розрахункової температури, МПа;
- $F$  – осьова стискаюча сила або розрахункове зусилля, що діє на шпильки, Н;
- $F_Q$  – осьове навантаження від дії тиску середовища на кришку, Н;
- $F_p$  – осьова реакція прокладки, Н;
- $F_{u1}$  – монтажне зусилля затягання шпильок, МН;
- $F_{u2}$  – осьове навантаження від дії тиску середовища на кришку, МН;
- $[F]$  – допустима осьова стискаюча сила, Н;
- $[F]_E$  – допустима осьова стискаюча сила з умов стійкості в границях пружності, Н;

$[F]_{E2}$  – допустима осьова стискуюча сила з умов загальної стійкості в границях пружності, Н;  
 $[F]_{\sigma}$  – допустима осьова стискуюча сила з умов міцності, Н;  
 $H$  – висота днища, м;  
 $H_p$  – висота шару рідини, м;  
 $h$  – висота циліндричної частини (відбортовки) днища, м;  
 $h_0$  – висота ущільнювального кільця, м;  
 $h_1, h_2$  – основні розміри ущільнення з двоконусним кільцем, м;  
 $h_e$  – внутрішня висота днища без відбортовки, м;  
 $h_R$  – висота кільця по середній лінії ущільнювальної поверхні, м;  
 $K_1, K_2, k_1, k_2, k_3, k_e$  – коефіцієнти;  
 $L$  – довжина вала, м;  
 $l$  – розрахункова довжина обичайки, м;  
 $l_1$  – довжина циліндричної частини апарата, яка знаходиться під оболонкою, м;  
 $l_2$  – довжина відбортовки, м;  
 $l_3$  – розрахункова довжина елемента, що примикає до циліндричної обичайки, м;  
 $l_E$  – ефективна довжина конічного днища, м;  
 $l_{np}$  – зведена довжина обичайки, м;  
 $m$  – прокладочний коефіцієнт;  
 $m_1, m_2$  – маси мішалок, кг;  
 $N_{m1}, N_{m2}$  – потужність мішалок, кВт;  
 $n$  – кількість обертів в одиницю часу, об./с;  
 $n_B$  – коефіцієнт запасу міцності за границею міцності;  
 $n_T$  – коефіцієнт запасу міцності за границею плинності;  
 $n_y$  – коефіцієнт запасу стійкості;  
 $p$  – розрахунковий внутрішній тиск, МПа;  
 $p_F$  – розрахунковий тиск з урахуванням впливу попереднього зтягання при визначенні розрахункового зусилля, МПа;  
 $p_3$  – розрахунковий зовнішній тиск, МПа;  
 $p_{abs}$  – абсолютний тиск, МПа;  
 $p_{atm}$  – атмосферний тиск, МПа;  
 $p_z$  – гідростатичний тиск, МПа;  
 $p_u$  – пробний тиск, МПа;

$p_n$ – надлишковий тиск, МПа;

$p_{роб}$  – робочий тиск, МПа;

$[p]$ –допустимий надлишковий тиск, МПа;

$[p_\varphi]$ –допустимий зовнішній тиск, МПа;

$[p_\varphi]_E$  –допустимий зовнішній тиск з умов стійкості в границях пружності, МПа;

$[p_\varphi]_\sigma$ –допустимий зовнішній тиск з умов міцності, МПа;

$R_{0,2}$ – мінімальне значення умовної границі плинності за розрахункової температури (напруження, за якого залишкове видовження становить 0,2 %), МПа;

$R_{0,2}^{20}$  – мінімальне значення умовної границі плинності за температури 20 °С (напруження, за якого залишкове видовження становить 0,2 %), МПа;

$R_{1,0}$ – мінімальне значення умовної границі плинності за розрахункової температури (напруження, за якого залишкове видовження становить 1 %), МПа;

$R_{1,0}^{20}$  – мінімальне значення умовної границі плинності за температури 20 °С (напруження, за якого залишкове видовження становить 1 %), МПа;

$R_\sigma$ – мінімальне значення тимчасового опору (границі міцності) за розрахункової температури, МПа;

$R_\delta$ – внутрішній радіус кривизни в вершині днища або кришки, м;

$R_e$  – внутрішній радіус кривизни у вершині еліптичного днища, м;

$R_T^{20}$  – границя плинності за температури 20 °С, МПа;

$R_\delta$ – границя плинності за розрахункової температури, МПа;

$S$ – виконавча товщина стінки обичайки (посудини), м;

$S^l$ – виконавча товщина стінки обичайки (посудини) у першому наближенні, м;

$S_R$ – розрахункова товщина стінки, м;

$S_\delta$ – виконавча товщина стінки днища, м;

$S_\delta^1$  – виконавча товщина стінки днища у першому наближенні, м;

$S_{\delta R}$ – розрахункова товщина стінки днища, м;

$S_\kappa$ – виконавча товщина конічного днища у безмоментній зоні, м;

$S_{\kappa}^1$  – виконавча товщина конічного днища у безмоментній зоні у першому наближенні, м;  
 $S_{\kappa R}$  – розрахункова товщина стінки днища, м;  
 $S_{np}$  – товщина прокладки, м;  
 $t$  – розрахункова температура, °С;  
 $t_3$  – зовнішня температура, °С;  
 $t_6$  – внутрішня температура, °С;  
 $v_{кор}$  – швидкість корозії (проникність), м/рік;  
 $x$  – коефіцієнт;  
 $z_1$  – координата ущільнення вала, м;  
 $z_2$  – координата середини вала, м;  
 $z_3$  – координата місця розташування першої мішалки, м;  
 $z_4$  – координата місця розташування другої мішалки, м;  
 $\alpha, \alpha_{\kappa}$  – половини кута при вершині конічної оболонки (днища), град;  
 $\alpha_r$  – коефіцієнт лінійного розширення, 1/град.;  
 $\beta$  – коефіцієнт товстостінності;  
 $\beta_R$  – розрахунковий коефіцієнт товстостінності;  
 $\gamma$  – кут нахилу ущільнювальної поверхні корпусу або кришки посудини до вертикалі, град.;  
 $\gamma_r$  – кут нахилу ущільнювальної поверхні ущільнювального кільця, град.;  
 $\Delta t$  – перепад температур, °С;  
 $\eta$  – поправковий коефіцієнт;  
 $\lambda$  – гнучкість;  
 $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  
 $\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho$  – кут тертя;  
 $\sigma_{екв}$  – еквівалентне напруження, МПа;  
 $\sigma_n$  – герметизуюче напруження зім'якшення прокладки для розрахункового тиску, МПа;  
 $\sigma_T$  – границя плинності за розрахункової температури, МПа;  
 $\sigma_{0.6}$  – мінімальне значення границі плинності матеріалу поверхні, що ущільнюється, при розрахунковій температурі, МПа;

$\sigma_{\partial. \partial.}$  – мінімальне значення границі плинності матеріалу кришки при розрахунковій температурі, МПа;

$[\sigma]$  – допустиме напруження за розрахункової температури, МПа;

$[\sigma]_к$  – допустиме контактне напруження на ущільнювальних поверхнях при розрахунковій температурі, МПа;

$[\sigma]_{20}$  – допустиме напруження за температури 20 °С, МПа;

$\tau$  – строк служби апарата, рік;

$\varphi$  – коефіцієнт міцності зварного шва;

$\varphi_p$  – розрахунковий коефіцієнт міцності зварного шва;

## 1. ВИХІДНІ ДАНІ ДО РОЗРАХУНКУ АПАРАТА

Апарат знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p$ . З боку оболонки на корпус діє зовнішній тиск  $p_3$ . Елементи апарата зварені з листового прокату. Довжина зварних швів, що контролюються, становить 100 % від загальної довжини. Конічне днище виконано без відбортовки. Схема апарата наведена на рисунку 1.1, а вихідні дані для розрахунку – у таблицях 1.1 і 1.2.

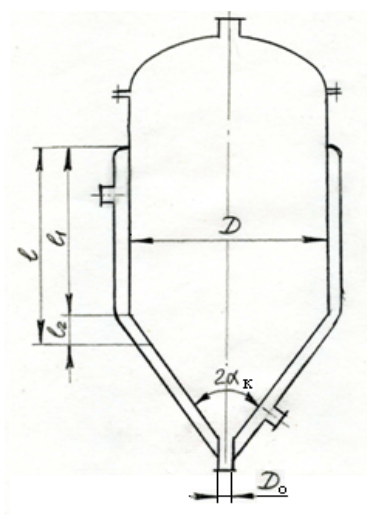


Рис. 1.1. Схема апарата

Таблиця 1.1. Вид зварного шва

Варіант	Вид зварного шва
1, 2	Стиковий, що виконується вручну з одного боку
3, 4	Стиковий з двобічним суцільним проваром, що виконується автоматичним зварюванням
5, 6, 7	Стиковий, що доступний для зварювання з одного боку і що має у процесі зварювання металеву підкладку з боку кореня шва, яка прилягає по всій довжині шва до основного металу
8, 9, 10, 11	Стиковий з підварюванням кореня шва, що виконується вручну
12, 13	Стиковий з двобічним суцільним проваром, що

	виконується автоматичним зварюванням
14, 15	Стиковий з підварюванням кореня шва, що виконується вручну
16, 17	Стиковий з двобічним суцільним проваром, що виконується автоматичним зварюванням
18, 19, 20	Стиковий з підварюванням кореня шва, що виконується вручну

У прикладах подані розрахунки елементів цього апарата за робочих умов.

Тлумачення умовних позначень величин, які наведені у таблиці 1.2 можна отримати з переліку позначень.

Таблиця 1.2. Вихідні дані до розрахунку

Ва- ріант	$D$ , м	$D_o$ , м	$l_l$ , м	$\alpha_k$ , град	$p$ , МПа	$p_z$ , МПа	$t$ , °C	Марка сталі елементів апарата	$v_{кор}$ , мм/рік	$\tau$ , рік
1	0,9	0,06	0,6	45	1,1	0,8	170	09Г2С	0,03	10
2	1	0,07	0,8	30	1,0	0,6	160	20К	0,08	15
3	1	0,07	0,9	45	1,1	0,7	165	16ГС	0,03	20
4	1,2	0,09	1,1	30	0,8	0,5	155	20	0,08	20
5	1,2	0,09	1,25	45	1,0	0,7	165	09Г2С	0,04	15
6	1,4	0,1	1,4	30	0,7	0,4	150	Ст3пс	0,05	20
7	1,4	0,1	1,6	45	0,9	0,6	160	16ГС	0,03	10
8	1,6	0,11	1,6	30	0,6	0,4	150	20	0,06	15
9	1,6	0,11	1,8	45	0,8	0,6	100	09Г2С	0,04	20
10	1,8	0,13	1,6	30	0,63	0,4	150	20	0,05	10
11	1,8	0,13	1,8	45	0,7	0,4	150	20К	0,06	15
12	2	0,14	2,2	30	0,54	0,3	140	Ст3пс	0,04	20
13	2	0,14	2,5	45	0,74	0,5	155	20К	0,07	10
14	2,2	0,16	1,6	30	0,54	0,4	150	10	0,08	15
15	2,2	0,16	1,8	45	0,64	0,5	155	Ст3пс	0,05	20
16	2,4	0,17	2,8	45	0,44	0,3	140	10	0,07	10
17	2,6	0,19	2,8	45	0,54	0,4	150	Ст3пс	0,05	15
18	2	0,14	2,5	30	0,50	0,4	170	09Г2С	0,07	20
19	2	0,14	2,5	45	0,45	6	175	16ГС	0,06	15
20	2	0,14	2,2	30	0,40	7	160	09Г2С	0,05	10



## 2. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1.

### РОЗРАХУНКОВІ ПАРАМЕТРИ І ДОПУСТИМІ НАПРУЖЕННЯ

#### Література.

1. Андреев І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

2. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.-148 с.

3. Андреев І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

#### Завдання на 1 практичне заняття.

Визначити: 1) робочий, розрахунковий, умовний, пробний тиск всередині апарата; 2) розрахункову температуру для циліндричної обичайки апарата; 3) допустиме напруження для матеріалу циліндричної обичайки апарата; 4) додток до розрахункової товщини стінки циліндричної обичайки апарата; 5) коефіцієнт міцності зварного шва для циліндричної обичайки апарата.

Таблиці для визначення допустимих напружень  $[\sigma]$  і коефіцієнтів міцності зварних швів  $\phi$  наведені у додатках А і Б.

#### Приклади до розділу

**1.Завдання.** Визначити робочий тиск  $p_{роб}$  у посудині. Результат надати у МПа.

*Вихідні дані.* Абсолютний тиск у посудині становить  $p_{абс} = 8$  ата.

*Рішення.* Надлишковий тиск  $p_n = p_{абс} - p_{атм} = 8 - 1 = 7$  ати

Через те, що  $1 \text{ кгс/см}^2 = 0,0981 \text{ МПа}$ , а за визначенням робочий тиск є надлишковим тиском без врахування гідростатичного тиску, короткочасного підвищення тиску під час спрацювання запобіжних пристроїв і т. ін.

$$p_{роб} = p_n = 7 \cdot 0,0981 = 0,6867 \text{ МПа}.$$

**2.Завдання.** Визначити розрахунковий тиск  $p$  у посудині.

*Вихідні дані.* Робочий тиск становить  $p_{роб} = 0,5 \text{ МПа}$ , висота шару рідини в посудині  $H_p = 3,2 \text{ м}$ , густина рідини  $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$ .

*Рішення.* Гідростатичний тиск  $p_z = \rho g H_p = 1250 \cdot 9,81 \cdot 3,2 = 39240 \text{ Па}$

$$p_z / p_{роб} = 0,039240 / 0,5 = 0,078 > 0,05,$$

тому  $p = p_{роб} + p_z = 0,5 + 0,039 = 0,539 \text{ МПа}$ .

**3.Завдання.** Визначити гідростатичний тиск  $p_z$  у посудині.

*Вихідні дані.* Висота шару рідини становить  $H_p = 3,2 \text{ м}$ , густина рідини  $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$ .

*Рішення.* Гідростатичний тиск  $p_z = \rho g H_p = 1250 \cdot 9,81 \cdot 3,2 = 39240 \text{ Па} = 0,039 \text{ МПа}$ .

**4.Завдання.** Визначити розрахунковий тиск  $p$  (МПа) у посудині.

*Вихідні дані.* Робочий тиск становить  $p_{роб} = 1,1 \text{ МПа}$ , висота шару рідини  $H_p = 0,9 \text{ м}$ , густина рідини  $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$ .

*Рішення.* Гідростатичний тиск  $p_z = \rho g H_p = 1400 \cdot 9,81 \cdot 0,9 = 12361 \text{ Па} = 0,012361 \text{ МПа}$

$$p_z / p_{роб} = 0,012361 / 1,1 = 0,0112 < 0,05, \text{ тому } p = p_{роб} = 1,1 \text{ МПа}.$$

**5.Завдання.** Визначити розрахунковий тиск  $p$  у посудині. Результат надати у МПа.

*Вихідні дані.* Абсолютний тиск становить  $p_{абс} = 6,0$  ата, висота шару рідини в посудині  $H_p = 3,2$  м, густина рідини  $\rho = 1250$  кг/м<sup>3</sup>.

*Рішення.* Надлишковий тиск

$$p_n = p_{абс} - p_{атм} = 6 - 1 = 5 \text{ ати} = 0,4905 \text{ МПа} \quad (1 \text{ кгс/см}^2 = 0,0981 \text{ МПа}).$$

Робочий тиск

$$p_{роб} = p_n = 0,4905 \text{ МПа.}$$

Гідростатичний тиск

$$p_z = \rho g H_p = 1250 \cdot 9,81 \cdot 3,2 = 39240 \text{ Па} = 0,03924 \text{ МПа}$$

Відношення  $p_z / p_{роб} = 0,03924 / 0,4905 = 0,08 > 0,05$ , тому

$$p = p_{роб} + p_z = 0,4905 + 0,03924 = 0,52974 \text{ МПа.}$$

**6.Завдання.** Визначити пробний тиск  $p_u$  для зварної посудини.

*Вихідні дані.* Розрахунковий тиск становить  $p = 0,8$  МПа, допустиме напруження матеріалу посудини при розрахунковій температурі  $[\sigma] = 140$  МПа і допустиме напруження матеріалу посудини при 20°C  $[\sigma]_{20} = 150$  МПа.

$$\text{Рішення. } p_u = 1,25 p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,25 \cdot 0,8 \frac{150}{140} = 1,07 \text{ МПа.}$$

**7.Завдання.** Визначити пробний тиск  $p_u$  для литої посудини.

*Вихідні дані.* Розрахунковий тиск становить  $p = 0,8$  МПа, допустиме напруження матеріалу посудини при розрахунковій температурі  $[\sigma] = 140$  МПа і допустиме напруження матеріалу посудини при 20°C  $[\sigma]_{20} = 150$  МПа.

$$\text{Рішення. } p_u = 1,5 p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,5 \cdot 0,8 \frac{150}{140} = 1,286 \text{ МПа.}$$

**8.Завдання.** Визначити пробний тиск  $p_u$  для кріогенної посудини при наявності вакууму в ізоляційному просторі.

*Вихідні дані.* Розрахунковий тиск становить  $p = 0,8$  МПа.

*Рішення.*  $p_u = 1,25p - 0,1 \text{ МПа} = 1,25 \cdot 0,8 - 0,1 = 0,9 \text{ МПа}$ .

**9.Завдання.** Визначити пробний тиск  $p_u$  для зварної посудини.

*Вихідні дані.* Робочий тиск становить  $p_{роб} = 0,5$  МПа, висота шару рідини в посудині  $H_p = 3,2$  м, густина рідини  $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$ , допустиме напруження матеріалу посудини при розрахунковій температурі  $[\sigma] = 140$  МПа і допустиме напруження матеріалу посудини при  $20^\circ\text{C}$   $[\sigma]_{20} = 150$  МПа.

*Рішення.* Гідростатичний тиск  $p_z = \rho g H_p = 1250 \cdot 9,81 \cdot 3,2 = 39240 \text{ Па}$

$p_z / p_{роб} = 0,039240 / 0,5 = 0,078 > 0,05$ , тому розрахунковий тиск  $p = p_{роб} + p_z = 0,5 + 0,039 = 0,539 \text{ МПа}$

Пробний тиск  $p_u = 1,25p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,25 \cdot 0,539 \frac{150}{140} = 0,722 \text{ МПа}$

**10.Завдання.** Визначити пробний тиск  $p_u$  для литої посудини.

*Вихідні дані.* Робочий тиск становить  $p_{роб} = 1,1$  МПа, висота шару рідини в посудині  $H_p = 0,9$  м, густина рідини  $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$ , допустиме напруження матеріалу посудини при розрахунковій температурі  $[\sigma] = 140$  МПа і допустиме напруження матеріалу посудини при  $20^\circ\text{C}$   $[\sigma]_{20} = 150$  МПа.

*Рішення.* Гідростатичний тиск  $p_z = \rho g H_p = 1400 \cdot 9,81 \cdot 0,9 = 12361 \text{ Па} = 0,012361 \text{ МПа}$

$p_z/p_{pob} = 0,012361/1,1 = 0,0112 < 0,05$ , тому розрахунковий тиск  $p = p_{pob} = 1,1$  МПа,

$$\text{Пробний тиск } p_u = 1,5 p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,5 \cdot 1,1 \frac{150}{140} = 1,768 \text{ МПа}.$$

**11.Завдання.** Визначити розрахунковий тиск  $p$  для елемента, що розділяє простори з різними тисками, якщо забезпечується одночасна дія цих тисків.

*Вихідні дані.* Розрахункові тиски у просторах:  $p_1 = 0,7$  МПа,  $p_2 = 0,2$  МПа.

*Рішення.* Для випадку, коли забезпечується одночасна дія тисків, тоді допускається виконувати розрахунок на різницю цих тисків, тобто

$$p = p_1 - p_2 = 0,7 - 0,2 = 0,5 \text{ МПа}.$$

**12.Завдання.** Визначити допустиме напруження матеріалу сталевій зварної посудини при гідравлічних випробуваннях  $[\sigma]$

*Вихідні дані.* Границя плинності сталі при 20°C:  $R_T^{20} = 400$  МПа.

*Рішення.* Для випадку гідравлічних випробувань коефіцієнт запасу міцності за границею плинності  $n_T = 1,1$ ; поправочний коефіцієнт для зварної конструкції  $\eta = 1$ .

Тому допустиме напруження матеріалу сталевій посудини при гідравлічних випробуваннях можна визначити за формулою:

$$[\sigma] = \eta \frac{R_T^{20}}{n_T} = 1 \frac{400}{1,1} = 363,64 \text{ МПа}.$$

**13.Завдання.** Визначити виконавчу товщину  $S$  стінки посудини.

*Вихідні дані.* Розрахункова товщина стінки посудини  $S_R = 0,00695$  м, швидкість корозії матеріалу стінки через однобічний контакт з корозійним середовищем  $v_{кор} = 0,07$  мм/рік, термін роботи посудини  $\tau = 15$  років, сума технологічного додатка  $C_3$  і додатка до розрахункової товщини, який враховує від'ємний допуск  $C_2$  менше 5% номінальної товщини стінки посудини. Додаток на компенсацію ерозії  $C_e$  не враховується.

*Рішення.* Виконавча товщина стінки посудини  $S = S_R + C + C_0$ ;

Сума додатків до розрахункової товщини  $C = C_1 + C_2 + C_3$

Через те, що  $v_{кор} > 0,05$  мм/рік додаток для компенсації корозії  $C_1$  розраховується за формулою  $C_1 = v_{кор} \cdot \tau = 0,07 \cdot 15 = 1,05$  мм =  $1,05 \cdot 10^{-3}$  м.

Через те, що  $C_2 + C_3 < 0,05 S$ ,  $C_2$  і  $C_3$  не враховуються при розрахунку.

Тоді  $S = 0,00695 + 1,05 \cdot 10^{-3} + 0 = 0,008$  м (додаток до розрахункової товщини стінки, що йде на округлення до найближчої стандартної товщини листа  $C_0 = 0$  м).

**14.Завдання.** Визначити виконавчу товщину  $S$  стінки обичайки, яка зварена з листового прокату.

*Вихідні дані.* Розрахункова товщина стінки посудини  $S_R = 0,0045$  м, швидкість корозії матеріалу стінки через контакт з корозійним середовищем  $v_{кор} = 0,07$  мм/рік, термін роботи посудини  $\tau = 15$  років, сума технологічного додатка  $C_3$  і додатка до розрахункової товщини, який враховує від'ємний допуск  $C_2$  менше 5% номінальної товщини стінки посудини. Має місце двобічний контакт з корозійним середовищем. Додаток на компенсацію ерозії  $C_e$  не враховується.

*Рішення.* Виконавча товщина стінки посудини  $S = S_R + C + C_0$ ;

Сума додатків до розрахункової товщини  $C = C_1 + C_2 + C_3$

Через те, що  $v_{кор} > 0,05$  мм/рік і корозійне середовище знаходиться з обох боків стінки, додаток для компенсації корозії  $C_1$  розраховується за формулою  $C_1 = 2 v_{кор} \cdot \tau = 2 \cdot 0,07 \cdot 15 = 1,05$  мм  $= 2,1 \cdot 10^{-3}$  м.

$C_2 + C_3 < 0,05 S$ , тому  $C_2$  і  $C_3$  не враховуються при розрахунку.

Тоді  $S = 4,5 \cdot 10^{-3} + 2,1 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 10^{-3} = 0,007$  м (додаток до розрахункової товщини стінки, що йде на округлення до найближчої стандартної товщини листа  $C_0 = 0,4 \cdot 10^{-3}$  м через те, що найближча товщина листового прокату дорівнює 7 мм).

**15.Завдання.** Визначити виконавчу товщину  $S$  стінки обичайки, яка зварена з листового прокату.

*Вихідні дані.* Розрахункова товщина стінки посудини  $S_R = 0,0047$  м, швидкість корозії матеріалу стінки через однобічний контакт з корозійним середовищем  $v_{кор} = 0,04$  мм/рік, термін роботи посудини  $\tau = 15$  років, сума технологічного додатка  $C_3$  і додатка до розрахункової товщини, який враховує від'ємний допуск  $C_2$  менше 5% номінальної товщини стінки посудини. Має місце двобічний контакт з корозійним середовищем. Додаток на компенсацію ерозії  $C_e$  не враховується.

*Рішення.* Виконавча товщина стінки посудини  $S = S_R + C + C_0$ ;

Сума додатків до розрахункової товщини  $C = C_1 + C_2 + C_3$

Через те, що  $v_{кор} < 0,05$  мм/рік, приймається додаток для компенсації корозії  $C_1 = 10^{-3}$  м.

$C_2 + C_3 < 0,05 S$ , тому  $C_2$  і  $C_3$  не враховуються при розрахунку.

Тоді  $S = 4,7 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} + 0,3 \cdot 10^{-3} = 0,006$  м (додаток до розрахункової товщини стінки, що йде на округлення до найближчої стандартної

товщини листа  $C_0 = 0,3 \cdot 10^{-3}$  м через те, що найближча товщина листового прокату дорівнює 6 мм).

**16.Завдання.** Визначити виконавчу товщину  $S$  стінки обичайки із вуглецевої сталі.

*Вихідні дані.* Внутрішній діаметр обичайки  $D = 2$  м. Розрахункова товщина стінки обичайки  $S_R = 0,0025$  м, швидкість корозії матеріалу стінки через однобічний контакт з корозійним середовищем  $v_{кор} = 0,07$  мм/рік, термін служби  $\tau = 15$  років, сума технологічного додатка  $C_3$  і додатка до розрахункової товщини, який враховує від'ємний допуск  $C_2$  менше 5% номінальної товщини стінки посудини. Додаток на компенсацію ерозії  $C_e$  не враховується.

*Рішення.* Виконавча товщина стінки обичайки  $S = S_R + C + C_0$ ;

Сума додатків до розрахункової товщини  $C = C_1 + C_2 + C_3$

Через те, що  $v_{кор} > 0,05$  мм/рік додаток для компенсації корозії  $C_1$  розраховується за формулою  $C_1 = v_{кор} \cdot \tau = 0,07 \cdot 15 = 1,05$  мм  $= 1,05 \cdot 10^{-3}$  м.

Через те, що  $C_2 + C_3 < 0,05 S$ ,  $C_2$  і  $C_3$  не враховуються при розрахунку.

Тоді  $S = 0,0025 + 1,05 \cdot 10^{-3} + C_0 = 3,55 \cdot 10^{-3} + C_0$  м.

Товщини обичайок, днищ, опор із вуглецевої сталі з урахуванням додатка для компенсації корозії повинні бути не менше  $D/1000 + 2,5 \cdot 10^{-3}$  м.

$$D/1000 + 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 2/1000 + 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Тобто приймаємо виконавчу товщину стінки обичайки  $S = 4,5 \cdot 10^{-3}$  м.



**17.Завдання.** Визначити виконавчу товщину  $S$  незнімного навантаженого елемента.

*Вихідні дані.* Розрахункова товщина незнімного навантаженого елемента  $S_R = 0,0045$  м, швидкість корозії матеріалу стінки через контакт з корозійним середовищем  $v_{кор} = 0,06$  мм/рік, термін роботи посудини  $\tau = 15$  років, додатки до розрахункової товщини  $C_2 = 0$ ,  $C_3 = 0$ ,  $C_e = 0$ . Додаток до розрахункової товщини незнімного навантаженого елемента  $C_0 = 0,2 \cdot 10^{-3}$  м

*Рішення.* Виконавча товщина стінки посудини  $S = S_R + C + C_0$ .

Сума додатків до розрахункової товщини  $C = C_1 + C_2 + C_3$ .

Через те, що  $v_{кор} > 0,05$  мм/рік і розраховується незнімний навантажений елемент, додаток для компенсації корозії  $C_1$  визначається за формулою

$$C_1 = 2 v_{кор} \cdot \tau = 2 \cdot 0,06 \cdot 15 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$\text{Тоді } S = 4,5 \cdot 10^{-3} + 1,8 \cdot 10^{-3} + 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,0065 \text{ м.}$$

**18.Завдання.** Визначити виконавчу товщину  $S$  стінки обичайки із аустенітної сталі.

*Вихідні дані.* Розрахункова товщина стінки обичайки  $S_R = 0,0025$  м, швидкість корозії матеріалу стінки через одnobічний контакт з корозійним середовищем  $v_{кор} = 0,07$  мм/рік, термін служби  $\tau = 15$  років, сума технологічного додатка  $C_3$  і додатка до розрахункової товщини, який враховує від'ємний допуск  $C_2$  менше 5% номінальної товщини стінки обичайки. Додаток на компенсацію ерозії  $C_e$  не враховується.

*Рішення.* Виконавча товщина стінки обичайки  $S = S_R + C + C_0$ ;

Сума додатків до розрахункової товщини  $C = C_1 + C_2 + C_3$

Через те, що  $v_{кор} > 0,05$  мм/рік додаток для компенсації корозії  $C_1$  розраховується за формулою  $C_1 = v_{кор} \cdot \tau = 0,07 \cdot 15 = 1,05$  мм  $= 1,05 \cdot 10^{-3}$  м.

Через те, що  $C_2 + C_3 < 0,05$  S,  $C_2$  і  $C_3$  не враховуються при розрахунку.

Тоді  $S = 0,0025 + 1,05 \cdot 10^{-3} + 0,45 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-3}$  м (додаток до розрахункової товщини стінки, що йде на округлення до найближчої стандартної товщини листа  $C_0 = 0,45 \cdot 10^{-3}$  м через те, що найближча товщина листового прокату дорівнює 4 мм).

З урахуванням вимоги, що товщина обичайки з урахуванням додатка для компенсації корозії, яка виконана із сталі аустенітного класу, повинна бути не менше  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м остаточно приймаємо виконавчу товщину стінки обичайки  $S = 4,0 \cdot 10^{-3}$  м.

**19.Завдання.** Визначити виконавчу товщину  $S$  знімного навантаженого елемента.

*Вихідні дані.* Розрахункова товщина знімного навантаженого елемента  $S_R = 0,0045$  м, швидкість корозії матеріалу стінки через контакт з корозійним середовищем  $v_{кор} = 0,06$  мм/рік, термін роботи посудини  $\tau = 15$  років, додатки до розрахункової товщини  $C_2 = 0$ ,  $C_3 = 0$ ,  $C_e = 0$ ,  $C_0 = 0$ .

*Рішення.* Виконавча товщина стінки посудини  $S = S_R + C + C_0$ .

Сума додатків до розрахункової товщини  $C = C_1 + C_2 + C_3$ .

Через те, що  $v_{кор} > 0,05$  мм/рік і розраховується знімний навантажений елемент, додаток для компенсації корозії  $C_1$  необхідно визначати за формулою  $C_1 = \max\{0,5 v_{кор} \cdot \tau; 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}\}$ .

$0,5 v_{кор} \cdot \tau = 2 \cdot 0,06 \cdot 15 = 1,8 \cdot 10^{-3}$  м. Остаточно приймаємо  $C_1 = 2 \cdot 10^{-3}$  м.

Тоді  $S = 4,5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} = 0,0065$  м.

### **3. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2.**

#### **РОЗРАХУНОК ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБИЧАЙКИ, ЯКА ЗНАХОДИТЬСЯ ПІД ДІЄЮ ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ**

##### **Література.**

1. Андреев І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

2. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни,- К.: 1999.-148 с.

3. Андреев І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

##### **Завдання на 2 практичне заняття.**

Розрахувати товщину циліндричної обичайки з умови міцності за безмоментною теорією у випадку, коли обичайка навантажена внутрішнім тиском.

У прикладі наведені розрахунки за 8 варіантом. Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Технологічний додаток  $C_3$  і додаток для компенсації ерозії  $C_e$  в наведених розрахунках не враховуються.

Таблиця 3.1. Алгоритм і приклад розрахунку товщини циліндричної обичайки з умови міцності за безмоментною теорією у випадку, коли обичайка навантажена внутрішнім тиском

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження матеріалу обичайки за розрахункової температури $[\sigma]$	$[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 – А.4 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка зварна)	З таблиці А.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури $t = 150^\circ\text{C}$ допустиме напруження $[\sigma] = 139 \text{ МПа}$
2.	Розрахунковий коефіцієнт міцності зварного шва $\phi_p$	$\phi_p$ визначають за таблицею Б.1 додатку Б залежно від виду зварного шва та довжини швів, що контролюються	Для стикового шва з підварюванням кореня, що виконується вручну, коли довжина контрольованих зварних швів становить 100 % від загальної довжини $\phi_p = 1,0$
3.	Розрахункова товщина стінки циліндричної обичайки $S_R$	$S_R = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p}$	$S_R = \frac{0,6 \cdot 1,6}{2 \cdot 139 \cdot 1 - 0,6} = 0,0035 \text{ м}$
4.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії $C_e$	Додаток $C_e$ належить враховувати при переміщенні в апараті рідких середовищ зі швидкостями більше 20 м/с, газоподібних – більше 100 м/с; при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок і при ударній дії середовища на деталь	$C_e = 0$
5.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії $C_1$	$C_1 = v_{\text{кор}}\tau + C_e$ , якщо $v_{\text{кор}} > 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}$ ;	$v_{\text{кор}} > 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}$ , тому $C_1 = v_{\text{кор}}\tau + C_e =$ $= 6 \cdot 10^{-5} \cdot 15 + 0 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
		$C_1 = 0,001 \text{ м} + C_e$ , якщо $v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}$ ; $C_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$ , але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує. Додаток $C_1$ при двобічному контакті з корозійним і (або) ерозійним середовищем належить відповідно збільшувати.	
6.	Виконавча товщина стінки циліндричної обичайки у першому наближенні $S^1$	$S^1 = S_R + C_1 + C_0$ Додаток $C_0$ вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1 додатку В.	$S^1 = 3,5 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ Обираємо $C_0 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ через те, що найближча товщина листового прокату становить $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
7.	Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску $C_2$	Додаток $C_2$ вибирається за таблицями В.2 – В.4.	Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 включно становить $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , тобто $C_2 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
8.	Технологічний додаток до розрахункової товщини $C_3$	Додаток $C_3$ враховується у випадках, коли має місце стоншення стінки елемента посудини або апарата при технологічних операціях: витяжці, штампуванні, гнутті труб і т. ін.	$C_3 = 0$
9.	Відношення суми додатків $C_2$ і $C_3$ до товщини $S^1$	$\frac{C_2 + C_3}{S^1}$	$\frac{2,3 \cdot 10^{-4} + 0}{4,5 \cdot 10^{-3}} = 0,051$
10.	Сума додатків до розрахун- кової товщини $C$	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S^1} \leq 0,05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S^1} > 0,05. \end{cases}$	$\frac{C_2 + C_3}{S^1} > 0,05, \text{ тому}$ $C = 9 \cdot 10^{-4} + 2,3 \cdot 10^{-4} + 0 = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
11.	Виконавча товщина стінки циліндричної обичайки $S$	$S = S_R + C + C_0$ Додаток $C_0$ вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1.	$S = 3,5 \cdot 10^{-3} + 1,13 \cdot 10^{-3} + 0,37 \cdot 10^{-3} =$ $= 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ Обираємо $C_0 = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ з урахуванням можливих додаткових навантажень під час транспортування, монтажу і т. ін.

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
12.	Перерахунок додатка до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску $C_2$ (виконується коли $S \neq S^1$ )	Додаток $C_2$ вибирається за таблицями В.2 – В.4.	Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 мм включно становить $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , тобто $C_2 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
13.	Відношення суми додатків $C_2$ і $C_3$ до товщини $S$ (виконується коли $S \neq S^1$ )	$\frac{C_2 + C_3}{S}$	$\frac{2,3 \cdot 10^{-4} + 0}{5 \cdot 10^{-3}} = 0,046$
14.	Перерахунок суми додатків до розрахункової товщини $C$ (виконується коли $S \neq S^1$ )	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S} \leq 0,05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S} > 0,05. \end{cases}$	$\frac{C_2 + C_3}{S} < 0,05, \text{ тому } C = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
15.	Перевірка умов застосування розрахункових формул	$\frac{S - C}{D} \leq 0,1 \quad \text{для обичайок і труб}$ $\text{при } D \geq 0,2 \text{ м}$	$\frac{S - C}{D} = \frac{5 \cdot 10^{-3} - 0,9 \cdot 10^{-3}}{1,6} = 0,0026 < 0,1$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
		$\frac{S - C}{D} \leq 0,3$ <p>для труб при <math>D &lt; 0,2</math> м.</p> <p><math>S \geq D/1000 + 2,5 \cdot 10^{-3}</math> м – для обичайок із вуглецевих і низьколегованих сталей;</p> <p><math>S \geq 2,5 \cdot 10^{-3}</math> м – для обичайок із сталей аустенітного і аустенітно-феритного класів.</p>	$D/1000 + 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} =$ $= 1,6/1000 + 2,5 \cdot 10^{-3} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$ $5 \cdot 10^{-3} \text{ м} > 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$ <p>Умови застосування розрахункових формул виконуються</p>
16.	Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[p]$	$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(S - C)}{D + S - C}$	$[p] = \frac{2 \cdot 139 \cdot 1(5 \cdot 10^{-3} - 0,9 \cdot 10^{-3})}{1,6 + 5 \cdot 10^{-3} - 0,9 \cdot 10^{-3}} = 0,71 \text{ МПа}$
17.	Перевірка умови міцності	$p \leq [p]$	$0,6 \text{ МПа} < 0,71 \text{ МПа}.$ <p>Умова міцності виконується.</p>
Якщо умова міцності не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови $p \leq [p]$ .			



#### **4. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 3.**

### **РОЗРАХУНОК ДНИЩ І КРИШОК, ЯКІ ЗНАХОДЯТЬСЯ ПІД ДІЄЮ ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ**

#### **Література.**

1. Андреев І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.
2. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.-148 с.
3. Андреев І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

#### **Завдання на 3 практичне заняття.**

Розрахувати товщину еліптичної кришки з умови міцності за безмоментною теорією у випадку, коли кришка навантажена внутрішнім тиском або розрахувати товщину конічного днища з умови міцності за безмоментною теорією у випадку, коли обичайка навантажена внутрішнім тиском.

У прикладах наведені розрахунки за 8 варіантом. Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Технологічний додаток  $C_3$  і додаток для компенсації ерозії  $C_e$  в наведених розрахунках не враховуються.

Таблиця 4.1. Алгоритм і приклад розрахунку товщини еліптичної кришки (або днища) з умови міцності у безмоментній зоні у випадку, коли кришка навантажена внутрішнім тиском

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
У прикладі розраховується стандартне еліптичне днище з висотою $h_g = 0,25D$ .			
1.	Внутрішній радіус кривизни у вершині кришки або днища $R_e$	$R_e = \frac{D^2}{4h_g}$	У випадку, що розглядається $h_g = 0,25D$ , тому $R_e = D = 1,6 \text{ м}$
2.	Допустиме напруження матеріалу кришки або днища за розрахункової температури $[\sigma]$	$[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 – А.4 залежно від марки сталі, з якої виконана кришка або днище і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що елемент, який розраховується, зварний)	З таблиці А.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури $t = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ допустиме напруження $[\sigma] = 139 \text{ МПа}$
3.	Розрахунковий коефіцієнт міцності зварного шва $\phi_p$	$\phi_p$ визначають за таблицею Б.1 залежно від виду зварного шва та довжини швів, що контролюються	Для стикового шва з підварюванням кореня, що виконується вручну, коли довжина контрольованих зварних швів становить 100 % від загальної довжини $\phi_p = 1,0$
4.	Розрахункова товщина стінки кришки або днища $S_{\partial R}$	$S_{\partial R} = \frac{pR_e}{2[\sigma]\phi - 0,5p}$	$S_{\partial R} = \frac{0,6 \cdot 1,6}{2 \cdot 139 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,6} = 0,0035 \text{ м}$

Продовження табл. 4.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії $C_e$	Додаток $C_e$ належить враховувати при переміщенні в апараті рідких середовищ зі швидкостями більше 20 м/с, газоподібних – більше 100 м/с; при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок і при ударній дії середовища на деталь	$C_e = 0$
6.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії $C_1$	$C_1 = v_{кор} \tau + C_e$ , якщо $v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}$ ; $C_1 = 0,001 \text{ м} + C_e$ , якщо $v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}$ ; $C_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$ , але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує. Додаток $C_1$ при двобічному контакті з корозійним і (або) ерозійним середовищем належить відповідно збільшувати.	$C_1 = v_{кор} \tau + C_e =$ $= 6 \cdot 10^{-5} \cdot 15 + 0 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ через те, що $v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}$
7.	Виконавча товщина стінки кришки або днища у першому наближенні $S_\partial^1$	$S_\partial^1 = S_{\partial R} + C_1 + C_0$ Додаток $C_0$ вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1.	$S_\partial^1 = 3,5 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} =$ $= 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ Обираємо $C_0 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ через те, що найближча товщина листового прокату становить $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Продовження табл. 4.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
8.	Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску $C_2$	Додаток $C_2$ вибирається за таблицями В.2 – В.4.	Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 включно становить $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , тобто $C_2 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
9.	Технологічний додаток до розрахункової товщини $C_3$	Додаток $C_3$ враховується у випадках, коли має місце стоншення стінки елемента посудини або апарата при технологічних операціях: витяжці, штампуванні, гнутті труб і т. ін.	$C_3 = 0$
10.	Відношення суми додатків $C_2$ і $C_3$ до товщини $S_\partial^1$	$\frac{C_2 + C_3}{S_\partial^1}$	$\frac{2,3 \cdot 10^{-4} + 0}{4 \cdot 10^{-3}} = 0,0575$
11.	Сума додатків до розрахункової товщини $C$	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_\partial^1} \leq 0,05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_\partial^1} > 0,05. \end{cases}$	$\frac{C_2 + C_3}{S_\partial^1} > 0,05, \text{ тому}$ $C = 9 \cdot 10^{-4} + 2,3 \cdot 10^{-4} + 0 = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
12.	Виконавча товщина стінки кришки або днища $S_\partial$	$S = S_R + C + C_0$ <p>Якщо довжина циліндричної відбортованої частини днища <math>h &gt; 0,8\sqrt{D(S_\partial - C)}</math>, тоді</p> $S_\partial = \frac{pD}{2[\sigma] - p} + C + C_0.$ <p>Додаток <math>C_0</math> вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1.</p>	<p>1) Якщо <math>h \leq 0,8\sqrt{D(S_\partial - C)}</math>, тоді</p> $S_\partial = 3,5 \cdot 10^{-3} + 1,13 \cdot 10^{-3} + 0,37 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ <p>Обираємо <math>C_0 = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}</math> з урахуванням можливих додаткових навантажень під час транспортування, монтажу і т. ін., а також того, що товщина обичайки, що стикується з кришкою (днищем) становить 5 мм.</p> <p>2) Якщо <math>h &gt; 0,8\sqrt{D(S_\partial - C)}</math>, тоді</p> $S_\partial = \frac{0,6 \cdot 1,6}{2 \cdot 139 - 0,6} + 1,13 \cdot 10^{-3} + 0,37 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ <p>Як і у першому випадку обираємо <math>C_0 = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}</math></p>
13.	Перерахунок додатка до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску $C_2$ (виконується коли $S_\partial \neq S_\partial^1$ )	Додаток $C_2$ вибирається за таблицями В.2 – В.4.	Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 включно становить $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , тобто $C_2 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
14.	Відношення суми додатків $C_2$ і $C_3$ до товщини $S_\partial$ (виконується коли $S_\partial \neq S_\partial^1$ )	$\frac{C_2 + C_3}{S_\partial}$	$\frac{2,3 \cdot 10^{-4} + 0}{5 \cdot 10^{-3}} = 0,046$
15.	Перерахунок суми додатків до розрахун- кової товщини $C$ (виконується коли $S_\partial \neq S_\partial^1$ )	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_\partial} \leq 0,05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_\partial} > 0,05. \end{cases}$	$\frac{C_2 + C_3}{S_\partial} < 0,05, \text{ тому } C = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
16.	Перевірка умов застосування розрахункових формул	$\begin{cases} 0,002 \leq \frac{S_\partial - C}{D} \leq 0,1, \\ 0,2 \leq \frac{h_g}{D} \leq 0,5. \end{cases}$	$\frac{S_\partial - C}{D} = \frac{5 \cdot 10^{-3} - 0,9 \cdot 10^{-3}}{1,6} = 0,0026,$ $0,002 < 0,0026 < 0,1.$ <p>За умовою задачі <math>\frac{h_g}{D} = 0,25,</math></p> $0,2 < 0,25 < 0,5.$ <p>Умови застосування розрахункових фор- мул виконуються</p>

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
17.	Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[p]$	$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi(S_\partial - C)}{R_e + 0.5(S_\partial - C)}$	$[p] = \frac{2 \cdot 139 \cdot 1(5 \cdot 10^{-3} - 0,9 \cdot 10^{-3})}{1,6 + 0,5(5 \cdot 10^{-3} - 0,9 \cdot 10^{-3})} = 0,71 \text{ МПа}$
18.	Перевірка умови міцності	$p \leq [p]$	$0,6 \text{ МПа} < 0,71 \text{ МПа}.$ Умова міцності виконується.
Якщо умова міцності не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови $p \leq [p]$ .			

Таблиця 4.2. Алгоритм і приклад розрахунку товщини конічного днища з умови міцності у безмоментній зоні у випадку, коли днище навантажене внутрішнім тиском

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
У прикладі розрахунковий діаметр конічного днища $D_k = D$ .			
1.	Допустиме напруження матеріалу днища за розрахункової температури $[\sigma]$	$[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 – А.4 залежно від марки сталі, з якої виконане днище і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що днище зварне)	З таблиці А.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури $t = 150^\circ\text{C}$ допустиме напруження $[\sigma] = 139 \text{ МПа}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
2.	Розрахунковий коефіцієнт міцності зварного шва $\varphi_p$	$\varphi_p$ визначають за таблицею Б.1 залежно від виду зварного шва та довжини швів, що контролюються	Для стикового шва з підварюванням кореня, що виконується вручну, коли довжина контрольованих зварних швів становить 100 % від загальної довжини $\varphi_p = 1,0$
3.	Розрахункова товщина стінки днища $S_{\kappa R}$ , м	$S_{\kappa R} = \frac{p D_{\kappa}}{2[\sigma] \varphi_p - p} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_{\kappa}}$	$S_{\kappa R} = \frac{0,6 \cdot 1,6}{2 \cdot 139 \cdot 1 - 0,6} \cdot \frac{1}{\cos 30^\circ} = 0,004 \text{ м}$
4.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії $C_e$	Додаток $C_e$ належить враховувати при переміщенні в апараті рідких середовищ зі швидкостями більше 20 м/с, газоподібних – більше 100 м/с; при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок і при ударній дії середовища на деталь	$C_e = 0$
5.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії $C_1$	Якщо $v_{\text{кор}} > 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}$ , тоді $C_1 = v_{\text{кор}} \tau + C_e$ ; інакше $C_1 = 0,001 \text{ м} + C_e$ . Якщо відсутні дані о величині $v_{\text{кор}}$ , але відомо, що матеріал днища стійкий до оточуючого середовища, тоді $C_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Додаток $C_1$ при двобічному контакті з корозійним і (або) ерозійним середовищем належить відповідно збільшувати.	$C_1 = v_{\text{кор}} \tau + C_e = 6 \cdot 10^{-5} \cdot 15 + 0 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , через те, що $v_{\text{кор}} > 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}$



№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
6.	Виконавча товщина стінки днища у першому наближенні $S_{\kappa}^1$	$S_{\kappa}^1 = S_{\kappa R} + C_1 + C_0$ Додаток $C_0$ вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1.	$S_{\kappa}^1 = 4 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ Обираємо $C_0 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ через те, що найближча товщина листового прокату становить $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
7.	Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску $C_2$	Додаток $C_2$ вибирається за таблицями В.2 – В.4.	Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 включно становить $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , тобто $C_2 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
8.	Технологічний додаток до розрахункової товщини $C_3$	Додаток $C_3$ враховується у випадках, коли має місце стоншення стінки елемента посудини або апарата при технологічних операціях: витяжці, штампуванні, гнутті труб і т. ін.	$C_3 = 0$
9.	Відношення суми додатків $C_2$ і $C_3$ до товщини $S_{\kappa}^1$	$\frac{C_2 + C_3}{S_{\kappa}^1}$	$\frac{2,3 \cdot 10^{-4} + 0}{5 \cdot 10^{-3}} = 0,046$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
10.	Сума додатків до розрахункової товщини $C$	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_\kappa^1} \leq 0,05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_\kappa^1} > 0,05. \end{cases}$	$\frac{C_2 + C_3}{S_\kappa^1} < 0,05$ , тому $C = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
11.	Виконавча товщина стінки днища $S_\kappa$	$S_\kappa = S_{\kappa R} + C + C_0$ Додаток $C_0$ вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1.	$S_\kappa = 4 \cdot 10^{-3} + 0,9 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 10^{-3} =$ $= 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ Обираємо $C_0 = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ через те, що найближча товщина листового прокату становить 5 мм.
12.	Перерахунок додатка до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску $C_2$ (виконується коли $S_\kappa \neq S_\kappa^1$ )	Додаток $C_2$ вибирається за таблицями В.2 – В.4.	—
13.	Відношення суми додатків $C_2$ і $C_3$ до товщини $S_\kappa$ (виконується коли $S_\kappa \neq S_\kappa^1$ )	$\frac{C_2 + C_3}{S_\kappa}$	—

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
14.	Перерахунок суми додатків до розрахункової товщини $C$ (виконується коли $S_\kappa \neq S_\kappa^1$ )	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_\kappa} \leq 0,05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_\kappa} > 0,05. \end{cases}$	—
15.	Перевірка умов застосування розрахункових формул	$0,001 \leq \frac{S_\kappa \cos \alpha_\kappa}{D} \leq 0,05$	$\frac{S_\kappa \cos \alpha_\kappa}{D} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cos 30^\circ}{1,6} = 0,0027,$ $0,001 < 0,0027 < 0,05.$ Умова застосування розрахункових формул виконується
16.	Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[p]$	$[p] = \frac{2[\sigma] \varphi_p (S_\kappa - C)}{\frac{D_\kappa}{\cos \alpha_\kappa} + (S_\kappa - C)}$	$[p] = \frac{2 \cdot 139 \cdot 1(5 \cdot 10^{-3} - 0,9 \cdot 10^{-3})}{\frac{1,6}{\cos 30^\circ} + (5 \cdot 10^{-3} - 0,9 \cdot 10^{-3})} = 0,615 \text{ МПа}$
17.	Перевірка умови міцності	$p \leq [p]$	$0,6 \text{ МПа} < 0,615 \text{ МПа}.$ Умова міцності виконується.
Якщо умова міцності не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови $p \leq [p]$ .			

## **5. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 4.**

### **РОЗРАХУНОК ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБИЧАЙКИ, ЯКА ЗНАХОДИТЬСЯ ПІД ДІЄЮ ЗОВНІШНЬОГО ТИСКУ**

#### **Література.**

1. Зубрій О.Г. Методические указания к проведению практических занятий по курсу “РК МАХП” – К.: КПИ, 1982. – 19с.
2. Андреев І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.
3. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.-148 с.
4. Андреев І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка””, 2002. – 216 с.
5. ГОСТ 14249 –89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.

#### **Завдання на практичне заняття.**

Розрахувати товщину циліндричної обичайки з умови міцності і стійкості, коли обичайка навантажена зовнішнім тиском.

У прикладі наведено розрахунок за 15 варіантом. Умови експлуатації – робочі. Приймається, що додаток до розрахункової товщини  $C = 1$  мм.

Таблиця 5.1. Алгоритм і приклад розрахунку товщини циліндричної обичайки з умови міцності і стійкості у випадку, коли обичайка навантажена зовнішнім тиском

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження матеріалу обичайки за розрахункової температури $[\sigma]$	Допустиме напруження матеріалу обичайки $[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 – А.4 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка зварна)	З таблиці А.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 155$ °С допустиме напруження $[\sigma] = 144$ МПа
2.	Модуль пружності в умовах розтягу $E$	Модуль пружності в умовах розтягу $E$ визначають за таблицею додатку Г залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (при випробуваннях приймається $t = 20$ °С)	З таблиці Г.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 155$ °С модуль пружності в умовах розтягу $E = 1,85 \cdot 10^5$ МПа
3.	Коефіцієнт запасу стійкості $n_y$	Значення коефіцієнту запасу стійкості обирають залежно від умов, при якому виконують розрахунок. $n_y = 2,4$ для робочих умов; $n_y = 1,8$ для умов випробувань	$n_y = 2,4$
4.	Коефіцієнт $k_1$	$k_1 = \frac{n_y p_3}{2,4 \cdot 10^{-6} E}$	$k_1 = \frac{2,4 \cdot 0,5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1,85 \cdot 10^5} = 2,7$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Розрахункова довжина елемента, що примикає до циліндричної обичайки $l_3$	$l_3 = \frac{H}{3}$ – для випуклих днищ; $l_3 = \frac{D}{6 \operatorname{tg} \alpha}$ – для конічних днищ без відбортовки, але не більше довжини конічного елемента; $l_3 = \max \left( r \sin \alpha; \frac{D}{6 \operatorname{tg} \alpha} \right)$ для конічних днищ з відбортовкою, але не більше довжини конічного елемента	Для конічних днищ без відбортовки $l_3 = \frac{2,2}{6 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ} = 0,367$ м Ця величина не перевищує довжини конічного елемента
6.	Розрахункова довжина обичайки $l$	$l = l_1 + l_2 + \frac{H}{3}$ – для посудин з випуклими днищами; $l = l_1 + l_2 + l_3$ – для апаратів з конічними днищами	$l = 1,8 + 0 + 0,367 = 2,167$ м
7.	Коефіцієнт $k_3$	$k_3 = \frac{l}{D}$	$k_3 = \frac{2,167}{2,2} = 0,985$
8.	Коефіцієнт $k_2$	$k_2$ визначається за номограмою (див. додаток Д) залежно від коефіцієнтів $k_1$ і $k_3$	$k_2 = 0,65$

Продовження табл. 5.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
9.	Розрахункова товщина стілки циліндричної обичайки	$S_R = \max \left\{ k_2 D \cdot 10^{-2}; \frac{1,1 p_3 D}{2[\sigma]} \right\}$	$S_R = \max \left\{ 0,65 \cdot 2,2 \cdot 10^{-2}; \frac{1,1 \cdot 0,5 \cdot 2,2}{2 \cdot 144} \right\} =$ $i \max \{ 1,43 \cdot 10^{-2}; 4,2 \cdot 10^{-3} \} = 1,43 \cdot 10^{-2}$
10.	Виконавча товщина стілки циліндричної обичайки у першому наближенні $S$	$S = S_R + C + C_0$ Додаток $C_0$ вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1 додатку В.	$S = 1,43 \cdot 10^{-2} + 1 \cdot 10^{-3} + 7 \cdot 10^{-4} = 16 \cdot 10^{-3} i$ Обираємо $\tilde{N}_0 = 7 \cdot 10^{-4} i$ через те, що вибрана товщина листового прокату становить $16 \cdot 10^{-3} m$
11.	Допустимий зовнішній тиск з умов міцності $[p]_\sigma$	$[p]_\sigma = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + s - c}$	$[p]_\sigma = \frac{2 \cdot 144(16 - 1) \cdot 10^{-3}}{2,2 + (16 - 1) \cdot 10^{-3}} = 1,95$ МПа
12.	Коефіцієнт $B_1$	$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right\}$	$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{2,2}{2,167} \sqrt{\frac{2,2}{100(16 - 1)10^{-3}}} \right\} =$ $= \min \{ 1,0; 11,62 \} = 1$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
13.	Допустимий зовнішній тиск з умов стійкості в границях пружності $[p]_E$	$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 l} \left[ \frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5}$	$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,85 \cdot 10^{+5}}{2,4 \cdot 1} \cdot \frac{2,2}{2,167} \left[ \frac{100(16 - 1) \cdot 10^{-3}}{2,2} \right]^{2,5} =$ $= 0,84 \text{ МПа}$
14.	Допустимий зовнішній тиск	$[p] = \frac{[p]_\sigma}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_\sigma}{[p]_E} \right)^2}}$	$[p] = \frac{1,95}{\sqrt{1 + \left( \frac{1,95}{0,84} \right)^2}} = 0,77$ МПа
15.	Перевірка умови стійкості	$p_3 \leq [p]$	$0,5 \text{ МПа} < 0,77 \text{ МПа}$ Умова стійкості виконується
Якщо умова міцності не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови $p_3 \leq [p]$ .			



## **6. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5**

### **РОЗРАХУНОК ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБИЧАЙКИ, ЯКА ЗНАХОДИТЬСЯ ПІД СПІЛЬНОЮ ДІЄЮ ЗОВНІШНЬОГО ТИСКУ І ОСЬОВОЇ СТИСКУЮЧОЇ СИЛИ**

#### **Література.**

1. Андреев І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.
2. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.-148 с.
3. Андреев І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.
4. ГОСТ 14249 –89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.

#### **Завдання на 5 практичне заняття.**

Перевірити умову стійкості циліндричної обичайки у випадку, коли вона знаходиться під сумісною дією зовнішнього тиску і осьової стискуючої сили.

У прикладі наведено розрахунок за 15 варіантом. Умови експлуатації – робочі. Приймається, що додаток до розрахункової товщини  $S = 1$  мм.

Товщину обичайки і її розрахункову довжину, допустимий зовнішній тиск беремо з попереднього розрахунку (з умови її навантаження зовнішнім тиском).

Таблиця 6.1. Алгоритм і приклад перевірки умови стійкості циліндричної обичайки у випадку, коли вона знаходиться під сумісною дією зовнішнього тиску і осьової стискуючої сили

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження матеріалу обичайки за розрахункової температури $[\sigma]$	Допустиме напруження матеріалу обичайки $[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 – А.4 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка зварна)	З таблиці А.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 155^{\circ}\text{C}$ допустиме напруження $[\sigma] = 144 \text{ МПа}$
2.	Модуль пружності в умовах розтягу $E$	Модуль пружності в умовах розтягу $E$ визначають за таблицею додатку Г залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (при випробуваннях приймається $t = 20^{\circ}\text{C}$ )	З таблиці Г.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 155^{\circ}\text{C}$ модуль пружності в умовах розтягу $E = 1,85 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
3.	Коефіцієнт запасу стійкості $n_{\sigma}$	Значення коефіцієнту запасу стійкості обирають залежно від умов, при якому виконують розрахунок. $n_{\sigma} = 2,4$ для робочих умов; $n_{\sigma} = 1,8$ для умов випробувань	$n_{\sigma} = 2,4$
4.	Осьова стискуюча сила $F$	$F = \frac{\pi(D + 2S)^2}{4} p_{\zeta}$	$F = \frac{3,14(2,2 + 2 \cdot 16 \cdot 10^{-3})^2}{4} 0,5 = 1,96 \text{ МН}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Допустима осьова стис- куюча сила з умов міцності $[F]_{\sigma}$	$[F]_{\sigma} = \pi(D + S - C)(S - C)[\sigma]$	$[F]_{\sigma} = 3,14(2,2 + 16 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3})(16 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3})144 =$ $= 15,02 \text{ МН}$
6.	Допустима осьова стис- куюча сила з умов місцевої стійкості в границях пруж- ності $[F]_{E1}$	$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^2 \left[ \frac{100(S - C)}{D} \right]^{2,5}$	$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,85 \cdot 10^{+5}}{2,4} \cdot 2,2^2 \left[ \frac{100(16 - 1) \cdot 10^{-3}}{2,2} \right]^{2,5} =$ $= 44,4 \text{ МН}$
7.	Зведена дов- жина обичай- ки $l_{np}$	$l_{np}$ визначається за таблицею додат- ка Ж	$l = l_{i\delta} = 2,167 \text{ м}$
8.	Гнучкість $\lambda$	$\lambda = \frac{2,83 l_{i\delta}}{D + S - C}$	$\lambda = \frac{2,83 \cdot 2,167}{2,2 + (16 - 1) \cdot 10^{-3}} = 2,77$
9.	Допустима осьова стискую- ча сила з умов загальної стій- кості в границях пружності $[F]_{E2}$	$[F]_{E2} = \pi(D + S - C)(S - C) \frac{E}{n_y} \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^2$	$[F]_{E2} = 3,14(2,2 + 16 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3})(16 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}) \cdot$ $\cdot \frac{1,85 \cdot 10^{+5}}{2,4} \left( \frac{3,14}{2,77} \right)^2 = 10332 \text{ МН}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
10.	Допустима осьова стиску- юча сила з умов стійкості в гра- ницях пружнос- ті $[F]_E$	$[F]_E = \min \{ [F]_{E1}; [F]_{E2} \}$	$[F]_E = \min \{ 44,4; 10332 \} = 44,4 \text{ МН}$
11.	Допустима осьова стис- куюча сила $[F]$	$[F] = \frac{[F]_\sigma}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_\sigma}{[F]_E} \right)^2}}$	$[F] = \frac{15,02}{\sqrt{1 + \left( \frac{15,02}{44,4} \right)^2}} = 14,22 \text{ МН}$
12.	Перевірка умови стійкос- ті	$\frac{p_\zeta}{[p_\zeta]} + \frac{F}{[F]} \leq 1$	$\frac{0,5}{0,77} + \frac{1,96}{14,22} = 0,787 < 1$ Умова стійкості виконується
<p>Якщо умова міцності не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови <math>\frac{p_\zeta}{[p_\zeta]} + \frac{F}{[F]} \leq 1</math>.</p>			

## **7. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 6.**

### **РОЗРАХУНОК КОНІЧНОГО ДНИЩА, ЯКЕ НАВАНТАЖЕНЕ ЗОВНІШНІМ ТИСКОМ**

#### **Література.**

1. Андреев І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.
2. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.-148 с.
4. Андреев І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка””, 2002. – 216 с.
5. ГОСТ 14249 –89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.

#### **Завдання на практичне заняття.**

Розрахувати товщину конічного днища з умови міцності і стійкості, коли днище навантажене зовнішнім тиском.

У прикладі наведено розрахунок за 15 варіантом. Умови експлуатації – робочі. Приймається, що додаток до розрахункової товщини  $C = 1$  мм.

Таблиця 7.1. Алгоритм і приклад розрахунку товщини конічного днища з умови міцності і стійкості у випадку, коли днище навантажене зовнішнім тиском

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження матеріалу обичайки за розрахункової температури $[\sigma]$	Допустиме напруження матеріалу обичайки $[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 – А.4 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка зварна)	З таблиці А.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 155^{\circ}\text{C}$ допустиме напруження $[\sigma] = 144 \text{ МПа}$
2.	Модуль пружності в умовах розтягу $E$	Модуль пружності в умовах розтягу $E$ визначають за таблицею додатку Г залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (при випробуваннях приймається $t = 20^{\circ}\text{C}$ )	З таблиці Г.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 155^{\circ}\text{C}$ модуль пружності в умовах розтягу $E = 1,85 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
3.	Коефіцієнт запасу стійкості $n_{\sigma}$	Значення коефіцієнту запасу стійкості обирають залежно від умов, при якому виконують розрахунок. $n_y = 2,4$ для робочих умов; $n_y = 1,8$ для умов випробувань	$n_y = 2,4$
4.	Коефіцієнт $k_1$	$k_1 = \frac{n_y p_3}{2,4 \cdot 10^{-6} E}$	$k_1 = \frac{2,4 \cdot 0,5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1,85 \cdot 10^5} = 2,7$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Ефективна довжина конічного днища $l_E$	$l_E = \frac{D - D_o}{2 \sin \alpha}$	$l_E = \frac{2,2 - 0,16}{2 \sin 45^\circ} = 1,44 \text{ м}$
6.	Виконавча товщина конічного днища у першому наближенні $S^1$	$S^1$ приймається конструктивно	Приймаємо (з попереднього розрахунку) $S^1 = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
7.	Ефективний діаметр конічного днища $D_E$	$D_E = \max \left\{ \frac{D + D_o}{2 \cos \alpha}; \frac{D}{\cos \alpha} - 0,31(D + D_o) \sqrt{\frac{D + D_o}{100(S^1 - C)}} \operatorname{tg} \alpha \right\}$	$D_E = \max \left\{ \frac{2,2 + 0,16}{2 \cos 45^\circ}; \frac{2,2}{\cos 45^\circ} - 0,31(2,2 + 0,16) \sqrt{\frac{2,2 + 0,16}{100(16 - 1)10^{-3}}} \operatorname{tg} 45^\circ \right\} =$ $= \max \{1,67; 2,194\} = 2,194 \text{ м}$
8.	Коефіцієнт $k_3$	$k_3 = \frac{l_E}{D_E}$	$k_3 = \frac{1,44}{2,194} = 0,656$
9.	Коефіцієнт $k_2$	$k_2$ визначається за номограмою (див. додаток Д) залежно від коефіцієнтів $k_1$ і $k_3$	$k_2 = 0,55$

Продовження табл. 7.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
10.	Розрахункова товщина стінки циліндричної обичайки	$S_R = \max \left\{ k_2 D_E \cdot 10^{-2}; \frac{1,1 p_\sigma D_E}{2[\sigma]} \right\}$	$S_R = \max \left\{ 0,55 \cdot 2,194 \cdot 10^{-2}; \frac{1,1 \cdot 0,5 \cdot 2,194}{2 \cdot 144} \right\} =$ $= \max \{ 1,21 \cdot 10^{-2}; 4,2 \cdot 10^{-3} \} = 1,21 \cdot 10^{-2} \text{ м}$
11.	Виконавча товщина стінки циліндричної обичайки у першому наближенні $S$	$S = S_R + C + C_0$ Додаток $C_0$ вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1 додатку В.	$S = 1,21 \cdot 10^{-2} + 1 \cdot 10^{-3} + 2,9 \cdot 10^{-3} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ Обираємо $C_0 = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ через те, що вибрана товщина листового прокату дорівнює товщині циліндричної частини апарата і становить $16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
12.	Допустимий зовнішній тиск з умов міцності $[p_\sigma]_\sigma$	$[p_\sigma]_\sigma = \frac{2[\sigma](s-c)}{\frac{D}{\cos \alpha} + s - c}$	$[p_\sigma]_\sigma = \frac{2 \cdot 144(16-1) \cdot 10^{-3}}{\frac{2,2}{\cos 45^\circ} + (16-1) \cdot 10^{-3}} = 1,38 \text{ МПа}$
13.	Коефіцієнт $B_1$	$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{D_E}{l_E} \sqrt{\frac{D_E}{100(s-c)}} \right\}$	$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{2,194}{1,44} \sqrt{\frac{2,194}{100(16-1)10^{-3}}} \right\} =$ $= \min \{ 1,0; 17,41 \} = 1$



№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
14.	Допустимий зовнішній тиск з умов стійко- сті в границях пружності $[p_\varphi]_E$	$[p_\varphi]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E}{n_y B_1} \cdot \frac{D_E}{l_E} \left[ \frac{100(s-c)}{D_E} \right]^{2,5}$	$[p_\varphi]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,85 \cdot 10^{+5}}{2,4 \cdot 1} \cdot \frac{2,194}{1,44} \left[ \frac{100(16-1) \cdot 10^{-3}}{2,194} \right]^{2,5} =$ $= 0,944 \text{ МПа}$
15.	Допустимий зовнішній тиск $[p_\varphi]$	$[p_\varphi] = \frac{[p_\varphi]_\sigma}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p_\varphi]_\sigma}{[p_\varphi]_E} \right)^2}}$	$[p_\varphi] = \frac{1,38}{\sqrt{1 + \left( \frac{1,38}{0,944} \right)^2}} = 0,779 \text{ МПа}$
16.	Перевірка умови стійко- сті	$p_\varphi \leq [p_\varphi]$	$0,5 \text{ МПа} < 0,779 \text{ МПа}$ Умова міцності виконується
Якщо умова стійкості не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови $p_\varphi \leq [p_\varphi]$ .			

## **8. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 7.**

### **РОЗРАХУНОК ЕЛІПТИЧНОГО І ПІВСФЕРИЧНОГО ДНИЩ, ЯКІ НАВАНТАЖЕНІ ЗОВНІШНІМ ТИСКОМ**

#### **Література.**

1. Андреев І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.
2. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.-148 с.
4. Андреев І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.
5. ГОСТ 14249 –89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.

#### **Завдання на практичне заняття.**

Розрахувати товщину еліптичного днища з умови міцності і стійкості, коли днище навантажене зовнішнім тиском.

У прикладі наведено розрахунок за 15 варіантом. Умови експлуатації – робочі. Приймається, що додаток до розрахункової товщини  $C = 1$  мм.

Таблиця 8.1. Приклад розрахунку товщини стандартного еліптичного днища з умови міцності і стійкості у випадку, коли днище навантажене зовнішнім тиском  
(алгоритм подано для розрахунку еліптичного і півсферичного днищ)

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження матеріалу обичайки за розрахункової температури $[\sigma]$	Допустиме напруження матеріалу обичайки $[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 – А.4 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка зварна)	З таблиці А.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 155^{\circ}\text{C}$ допустиме напруження $[\sigma] = 144 \text{ МПа}$
2.	Модуль пружності в умовах розтягу $E$	Модуль пружності в умовах розтягу $E$ визначають за таблицею додатку Г залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (при випробуваннях приймається $t = 20^{\circ}\text{C}$ )	З таблиці Г.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 155^{\circ}\text{C}$ модуль пружності в умовах розтягу $E = 1,85 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
3.	Коефіцієнт запасу стійкості $n_y$	Значення коефіцієнту запасу стійкості обирають залежно від умов, при якому виконують розрахунок. $n_y = 2,4$ для робочих умов; $n_y = 1,8$ для умов випробувань	$n_y = 2,4$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
4.	Коефіцієнт $k_e$ для попереднього розрахунку	$k_e = 0,9$ – для еліптичного днища; $k_e = 1,0$ – для півсферичного днища	$k_e = 0,9$
5.	Внутрішній радіус кривизни в вершині днища або кришки $R_\partial$	$R_\partial = D$ для стандартного еліптичного днища; $R_\partial = 0,5D$ для півсферичного днища	$R_\partial = D = 2,2$ м
6.	Висота днища $H$	$H = 0,25D$ для стандартного еліптичного днища; $H = 0,5D$ для півсферичного днища	$H = 0,25D = 0,25 \cdot 2,2 = 0,55$ м
7.	Розрахункова товщина стінки днища $S_R$	$S_R = \max \left\{ \frac{k_e R_\partial}{510} \sqrt{\frac{n_y p_z}{10^{-6} E}}; \frac{p_z R_\partial}{2[\sigma]} \right\}$	$S_R = \max \left\{ \frac{0,9 \cdot 2,2}{510} \sqrt{\frac{2,4 \cdot 0,5}{10^{-6} \cdot 1,85 \cdot 10^5}}; \frac{0,5 \cdot 2,2}{2 \cdot 144} \right\} =$ $= \max \{0,0099; 0,0038\} = 0,0099$ м
8.	Виконавча товщина стінки днища $S$	$S = S_R + C + C_0$ Додаток $C_0$ вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1 додатку В.	$S = 9,9 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-4} = 11 \cdot 10^{-3}$ м Обираємо $C_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ м через те, що вибрана товщина листового прокату становить $11 \cdot 10^{-3}$ м
9.	Допустимий зовнішній тиск з умов міцності $[p_z]_\sigma$	$[p_z]_\sigma = \frac{2[\sigma](s - c)}{R_\partial + 0,5(s - c)}$	$[p_z]_\sigma = \frac{2 \cdot 144(11 - 1) \cdot 10^{-3}}{2,2 + 0,5(11 - 1) \cdot 10^{-3}} = 1,18$ МПа

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
10.	Коефіцієнт $x$	$x = 10 \frac{s-c}{D} \left( \frac{D}{2H} - \frac{2H}{D} \right)$	$x = 10 \frac{(11-1) \cdot 10^{-3}}{2,2} \left( \frac{2,2}{2 \cdot 0,55} - \frac{2 \cdot 0,55}{2,2} \right) = 0,068$
11.	Остаточне значення коефіцієнта $k_e$	$k_e = \frac{1 + (2,4 + 8x)x}{1 + (3 + 10x)x}$ або визначається за графіком (додаток Е)	$k_e = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot 0,068)0,068}{1 + (3 + 10 \cdot 0,068)0,068} = 0,96$
12.	Допустимий зовні- шній тиск з умов стійкості в границях пружності $[p_3]_E$	$[p_3]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} E}{n_y} \left[ \frac{100(s-c)}{k_e R_0} \right]^2$	$[p_3]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot 1,85 \cdot 10^{+5}}{2,4} \left[ \frac{100(11-1) \cdot 10^{-3}}{0,96 \cdot 2,2} \right]^2 =$ $= 0,45 \text{ МПа}$
13.	Допустимий зовні- шній тиск	$[p_3] = \frac{[p_3]_\sigma}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p_3]_\sigma}{[p_3]_E} \right)^2}}$	$[p_3] = \frac{1,18}{\sqrt{1 + \left( \frac{1,18}{0,45} \right)^2}} = 0,42 \text{ МПа}$
14.	Перевірка умови стійкості	$p_3 \leq [p_3]$	$0,5 \text{ МПа} > 0,42 \text{ МПа}$ Умова стійкості не виконується
<p>Якщо умова стійкості не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови <math>p_3 \leq [p_3]</math>.</p> <p>У нашому випадку умова стійкості буде виконуватись при <math>S = 12 \text{ мм}</math>, тоді <math>[p_3] = 0,505 \text{ МПа}</math></p>			

## **9. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 8, 9.**

### **РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ СПРОМОЖНОСТІ ОБИЧАЙКИ ПІД ОПОРОЮ**

#### **Література.**

1. В.Г. Доброногов, І.О. Микульонюк . Конструювання опорних вузлів хімічних апаратів і перевірка несучої спроможності обичайок що до опорних навантажень. Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1995.–184 с.

2. Андреев І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

3. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонюк І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.-148 с.

4. Андреев І.А., Мікульонюк І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

#### **Завдання на практичні заняття.**

Перевірити несучу спроможність обичайки під опорою типа «лапа» і необхідність застосування підкладного листа.

Умови експлуатації – робочі. Необхідні вихідні дані беруться з попередніх розрахунків.

Алгоритм розрахунку, необхідні довідкові матеріали і приклад наведені у посібнику [1].

## **10. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 10, 11.**

### **КРАЙОВІ НАВАНТАЖЕННЯ:**

#### **РОЗРАХУНОК КРАЙОВОЇ СИЛИ І КРАЙОВОГО МОМЕНТУ. РОЗРАХУНОК КРАЙОВИХ НАПРУЖЕНЬ І ПЕРЕВІРКА УМОВИ МІЦНОСТІ**

##### **Література.**

1. Зубрий О.Г. Миргородский В.Т. Методические указания по применению вычислительной техники по курсу “РК МАХП” Алгоритмы расчета краевых напряжений в конструкциях сосудов и аппаратов., Киев: КПИ, 1984. – 28с.

2. Андреев І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

3. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.-148 с.

4. Андреев І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

5. Михалев М.Ф., Третьяков Н.П., Мильченко А.И., Зобнин В.В. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Учеб. пособие. – Л.: Машиностроение, 1984. – 301 с.

##### **Завдання на 9 і 10 практичні заняття.**

Розрахувати крайову силу і крайовий момент в місці з’єднання циліндричної обичайки і еліптичного днища у випадку, коли корпус

апарата навантажений внутрішнім тиском. Перевірити умову міцності у крайовій зоні.

Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Технологічний додаток  $C_3$  і додаток для компенсації ерозії  $C_6$  не враховувати.

Товщини обичайки і днища (з умови їх навантаження внутрішнім тиском), сума додатків до розрахункової товщини беруться з попередніх розрахунків. Коефіцієнт Пуассона для розрахунків приймаємо:  $\mu=0,3$ .

Алгоритм і приклад розрахунку крайової сили і крайового моменту наведено у методичних вказівках [1]. Визначення напружень і перевірка умови міцності у крайовій зоні можна виконувати за алгоритмом, який наведено у методичних вказівках [1] або за методикою посібника [4].



## **11. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 12, 13, 14.**

### **РОЗРАХУНОК ВАЛІВ ПЕРЕМІШУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ НА ВІБРОСТІЙКІСТЬ, ЖОРСТКІСТЬ І МІЦНІСТЬ**

#### **Література.**

1. Доброногов В.Г., Зубрий О.Г., Воронин Л.Г. Алгоритм расчета на виброустойчивость валов механических перемешивающих устройств.. Методические указания по применению вычислительной техники по курсу “РК МАХП” , Киев: КПИ, 1988. – 51 с.

2. Доброногов В.Г., Зубрий О.Г., Воронин Л.Г. Алгоритм расчета на жесткость валов механических перемешивающих устройств.. Методические указания по применению вычислительной техники по курсу “РК МАХП” , Киев: КПИ, 1989. – 60 с.

3. Доброногов В.Г., Зубрий О.Г., Воронин Л.Г. Алгоритм расчета на прочность валов механических перемешивающих устройств.. Методические указания по применению вычислительной техники по курсу “РК МАХП” , Киев: КПИ, 1990. – 58 с.

4. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.-148 с.

5. Андреев І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

#### **Завдання на 12, 13 і 14 практичні заняття.**

Розрахувати вал постійного поперечного перерізу на вібростійкість, жорсткість і міцність.

Матеріал валу вважаємо суцільним однорідним середовищем з ідеальною пружністю, а деформації вала вважаємо малими порівняно з його розмірами.

Густина матеріалу вала  $7800 \text{ кг/м}^3$ .

Модуль пружності в умовах розтягу матеріалу вала  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ .

Схема апарата подана на рис. 11.1, а вихідні дані для розрахунку – у таблиці 11.1.

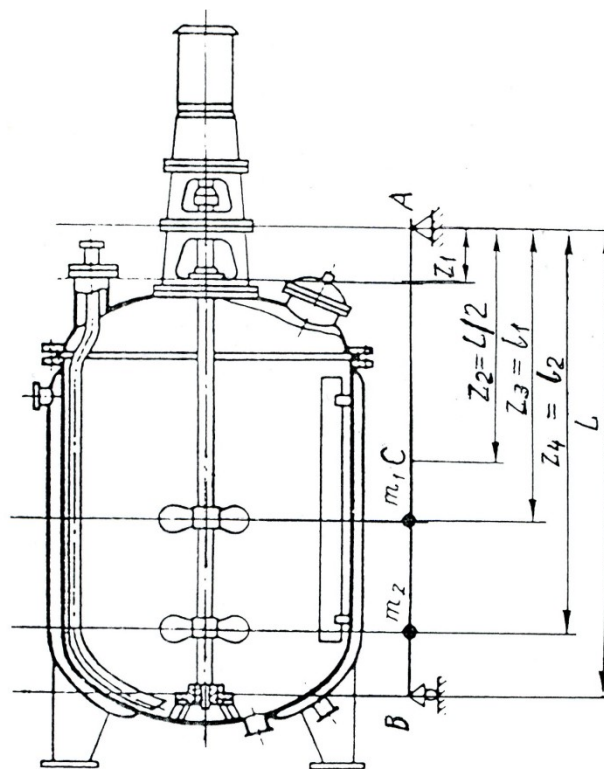


Рис. 11.1. Схема апарата з мішалкою

Алгоритм і приклад розрахунків валу на вібростійкість, жорсткість і міцність наведено у методичних вказівках [1-3].

Таблиця 11.1. Вихідні дані для розрахунку

Варіант	L, м	z <sub>1</sub> , м	z <sub>3</sub> , м	z <sub>4</sub> , м	n, об/хв	D, м	m <sub>1</sub> = m <sub>2</sub> , кг	d <sub>m1</sub> = d <sub>m2</sub> , м	N <sub>m1</sub> = N <sub>m2</sub> , кВт
1	3	0,3	1,6	2,5	200	1,5	36	0,5	3
2	3,2	0,3	1,8	2,5	200	1,6	36	0,5	3
3	3,4	0,3	1,8	2,8	200	1,7	40	0,6	3
4	3,6	0,4	1,9	3	150	1,8	45	0,6	3
5	3,8	0,4	2	3	150	1,9	48	0,6	4
6	4	0,4	2,2	3,4	150	2	52	0,7	4
7	4,2	0,4	2,2	3,7	140	2,1	52	0,7	4
8	4,5	0,5	2,3	3,8	140	2,2	56	0,7	4
9	4,8	0,5	2,5	4	140	2,4	60	0,8	5
10	5	0,5	2,6	4,2	120	2,5	64	0,8	5
11	5,4	0,5	2,8	4,4	120	2,7	66	0,9	5
12	5,6	0,6	2,9	4,6	120	2,8	66	0,9	5
13	6	0,6	3,1	5	100	3	70	1	5
14	6,2	0,6	3,2	5,2	100	3,1	70	1	5
15	6,5	0,7	3,3	5,4	90	3,2	75	1,1	6
16	6,8	0,7	3,5	5,6	90	3,4	80	1,1	6
17	7	0,7	3,6	5,8	90	3,5	80	1,1	6
18	4,6	0,5	2,4	3,9	130	2,6	55	0,9	5
19	5,2	0,5	2,7	4,3	130	2,8	65	0,9	5
20	5,5	0,5	2,8	4,5	130	2,8	60	0,9	5

## **12. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 15, 16.**

### **РОЗРАХУНОК ТОВЩИНИ СТІНКИ АПАРАТА ВИСОКОГО ТИСКУ. РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНЬ, ЯКІ ВИНИКАЮТЬ В КОРПУСІ АПАРАТА В РОБОЧИХ УМОВАХ**

#### **Література.**

1. Андреєв І.А., Зубрій О.Г. Конструювання та розрахунок апаратів високого тиску, - К.: ІЗМН, 1999. – 144 с.
2. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.- 148 с.
3. Андреєв І.А., Мікульонко І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

#### **Завдання на 15 і 16 практичні заняття.**

Під час розрахунків на міцність належить пам'ятати таке: коли значення пробного тиску буде більше значення, що розраховується за формулою  $1,35p[\sigma]_{20}/[\sigma]$ , тоді належить проводити перевірку на міцність конструктивних елементів посудин і апаратів, підставляє у відповідні формули значення пробного тиску і допустимого напруження при випробуваннях. Відповідно нормативним правилам тільки литі посудини і апарати, а також деталі, що виготовлені з литва, підлягають такій перевірці.

За розрахункову температуру приймаємо найбільшу температуру стінки.

Таблиця 12.1. Вихідні дані для розрахунку на 15, 16 і 17 практичні заняття

Варіант	D, м	D <sub>1</sub> , м	p, МПа	Матеріал корпусу	Матеріал кришки	t <sub>в</sub> , °C	t <sub>з</sub> , °C	Матеріал прокладки
1	0,6	0,62	10	22К	20	200	20	Алюміній
2	0,5	0,52	15	22К	22К	100	20	Мідь
3	0,4	0,42	20	09Г2С	20	20	100	Сталь
4	0,3	0,316	25	25Х3НМ	22Х3М	100	20	Сталь
5	0,2	0,216	30	25Х3НМ	25Х3НМ	20	100	Сталь
6	0,6	0,62	15	09Г2С	22К	100	20	Алюміній
7	0,5	0,52	10	20	20	200	20	Мідь
8	0,4	0,42	15	09Г2С	20	200	20	Сталь
9	0,3	0,316	20	09Г2С	22К	100	20	Сталь
10	0,2	0,216	25	25Х3НМ	09Г2С	20	100	Сталь
11	0,6	0,62	20	22Х3М	09Г2С	20	100	Сталь
12	0,5	0,52	25	22Х3М	22Х3М	20	100	Сталь
13	0,4	0,42	10	09Г2С	20	100	20	Алюміній
14	0,3	0,316	15	09Г2С	09Г2С	200	20	Мідь
15	0,2	0,216	20	25Х3НМ	22Х3М	100	20	Сталь
16	0,4	0,42	25	25Х3НМ	25Х3НМ	20	100	Мідь
17	0,3	0,316	30	25Х3НМ	22Х3М	100	20	Сталь
18	0,2	0,216	30	22Х3М	22Х3М	200	20	Сталь
19	0,6	0,62	18	09Г2С	20	20	100	Мідь
20	0,5	0,52	22	22Х3М	09Г2С	100	20	Сталь

**Вихідні данні для прикладів розрахунку (табл. 12.2, 12.3).**

Розрахунки виконані для робочих умов. Матеріал стінки – сталь 09Г2С; внутрішній діаметр  $D = 0,4$  м; додаток до розрахункової товщини стінки для компенсації корозії та (або) ерозії  $C_1 = 2$  мм; зварний шов – стиковий, виконується вручну з одного боку, довжина швів, що контролюються, становить 100 % від загальної довжини; внутрішня температура  $t_v = 100^\circ\text{C}$ ; зовнішня температура  $t_z = 20^\circ\text{C}$ ; коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha_t = 1,4 \cdot 10^{-5}$  1/град.; модуль пружності в умовах розтягу за розрахункової температури  $E = 1,91 \cdot 10^5$  МПа; коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,3$ .

На 15 практичному занятті необхідно розрахувати товщину циліндричної одношарової обичайки і виконати перевірний розрахунок з урахуванням температурних напружень.

**Початкові дані для прикладу розрахунку на міцність циліндричної одношарової обичайки (табл. 12.2).**

Обичайка виготовляється із сталевого листового прокату, призначена для роботи в умовах статичних навантажень.

Матеріал обичайки – сталь 09Г2С.

Зварний шов – стиковий, виконується вручну з одного боку. Вся довжина шва контролюється.

Внутрішній діаметр обичайки  $D$ .....0,4 м.

Розрахунковий внутрішній тиск  $p$ .....30 МПа.

Розрахункова температура  $t$ .....100 °С.

Швидкість підвищення температури стінки посудини при виведенні на режим і під час робочого процесу не перевищує 30 °С /год

Мінімальне значення границі плинності матеріалу обичайки при при розрахунковій температурі  $\sigma_T$  .....240 МПа

Мінімальне значення границі міцності матеріалу обичайки при при розрахунковій температурі  $\sigma_v$  .....385 МПа

Додаток для компенсації корозії  $C_1$ ..... $2 \cdot 10^{-3}$  м.

Технологічний додаток  $C_3$ .....0 м.

**Початкові дані для перевірного розрахунку циліндричної обичайки з урахуванням температурних напружень (табл. 12.3).**

Обичайка виготовляється із сталевого листового прокату, призначена для роботи в умовах статичних навантажень.

Матеріал обичайки – сталь 09Г2С.

Зварний шов – стиковий, виконується вручну з одного боку. Вся довжина шва контролюється.

Внутрішній діаметр обичайки  $D$ .....0,4 м.

Виконавча товщина обичайки S.....	0,05 м.
Сума додатків до розрахункової товщини C.....	$2 \cdot 10^{-3}$ м.
Розрахунковий внутрішній тиск p.....	30 МПа.
Розрахункова температура в апараті $t_b$ .....	100 °С.
Зовнішня температура $t_3$ .....	20 °С.
Модуль пружності матеріалу обичайки під час розтягу при розрахунковій температурі E.....	$1,91 \cdot 10^5$ МПа.
Коефіцієнт Пуассона $\mu$ .....	0,3.
Мінімальне значення границі плинності матеріалу обичайки при розрахунковій температурі $\sigma_t$ .....	240 МПа.
Коефіцієнт термічного розширення матеріалу обичайки при розрахунковій температурі $\alpha_t$ .....	$1,4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

На 16 практичному занятті треба розрахувати радіальне, кільцеве і осьове напруження в стінці циліндричної одношарової обичайки за формулами:

$$\sigma_r = \frac{pR^2}{R_3^2 - R^2} \left( 1 - \frac{R_3^2}{r^2} \right),$$

$$\sigma_t = \frac{pR^2}{R_3^2 - R^2} \left( 1 + \frac{R_3^2}{r^2} \right),$$

$$\sigma_N = \frac{pR^2}{R_3^2 - R^2}$$

і побудувати епюри змінювання цих напружень по товщині стінки.

Таблиця 12.2. *Приклад 1.* Алгоритм і приклад розрахунку на міцність циліндричної одношарової обичайки

№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Границя плинності за розрахункової температури	Границю плинності за розрахункової температури $R_{\delta}$ визначають за таблицею А.5 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури	З таблиці А.5 для сталі марки 09Г2С за розрахункової температури $t = 100^{\circ}\text{C}$ $R_{\delta} = 240$ МПа
2	Мінімальне значення тимчасового опору (границі міцності) за розрахункової температури	Мінімальне значення тимчасового опору (границі міцності) за розрахункової температури $R_{\epsilon}$ визначають за таблицею А.6 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури	З таблиці А.6 для сталі марки 09Г2С за розрахункової температури $t = 100^{\circ}\text{C}$ $R_{\epsilon} = 385$ МПа
3	Коефіцієнти запасу міцності	Коефіцієнт запасу міцності за границею міцності $n_b$ і коефіцієнт запасу міцності за границею плинності $n_T$ . Для робочих умов $n_T = 1,5$ ; $n_{\epsilon} = 2,4$ . Для умов випробувань $n_T = 1,1$ .	$n_T = 1,5$ ; $n_{\epsilon} = 2,4$
4	Коефіцієнт міцності зварного шва	$\varphi$ визначається за табл. Б.1 залежно від виду зварного шва та довжини швів, що контролюються	Для стикового шва, який виконується вручну з одного боку (довжина швів, що контролюються, становить 100 % від загальної довжини) $\varphi = 0,9$
5	Допустиме напруження матеріалу обичайки при розрахунковій температурі	$[\sigma] = \min \left\{ \frac{\sigma_T}{n_T}; \frac{\sigma_{\epsilon}}{n_{\epsilon}} \right\}$	$[\sigma] = \min \left\{ \frac{240}{1,5}; \frac{385}{2,4} \right\} = \min \{160; 160,4\} = 160 \text{ МПа}$
6	Розрахунковий коефіцієнт товстостійкості	$\beta_R = e^{\frac{p}{[\sigma]\varphi}}$	$\beta_R = e^{\frac{30}{160 \cdot 0,9}} = 1,232$
7	Товщина стінки обичайки у першому наближенні	$S' = 0,5D(\beta_R - 1) + C_1 + C_0,$ де $C_0$ – додаток на округлення до стандартної товщини листа	$S' = 0,5 \cdot 0,4 \cdot (1,232 - 1) + 2 \cdot 10^{-3} + 1,6 \cdot 10^{-3} = 0,05 \text{ м}$



№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
8	Відношення суми додатків $C_2$ і $C_3$ до номінальної товщини листа	$\frac{C_2 + C_3}{S'},$ де додаток $C_2$ визначається за табл. В.3 додатка 3	$\frac{1,2 \cdot 10^{-3} + 0}{0,05} = 0,024$
9	Сума додатків до розрахункової товщини	$C = \begin{cases} C_1, & \text{якщо } \frac{C_2 + C_3}{S'} \leq 0,05; \\ C_1 + C_2 + C_3, & \text{якщо } \frac{C_2 + C_3}{S'} > 0,05. \end{cases}$	$C = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
10	Виконавча товщина обичайки	$S = 0,5D(\beta_R - 1) + C + C_0$	$S = 0,5 \cdot 0,4(1,232 - 1) + 2 \cdot 10^{-3} + 1,6 \cdot 10^{-3} = 0,05 \text{ м}$
11	Коефіцієнт товстостінності	$\beta = \frac{D + 2(S - C)}{D}$	$\beta = \frac{0,4 + 2(0,05 - 0,002)}{0,4} = 1,24$
12	Допустимий тиск	$[p] = [\sigma] \varphi \ln \beta$	$[p] = 160 \cdot 0,9 \cdot \ln 1,24 = 30,97 \text{ МПа}$
13	Перевірка умови застосування розрахункових формул	$\frac{S - C}{D} \leq 0,4$	$\frac{0,05 - 0,002}{0,4} = 0,115 < 0,4$ Умова застосування розрахункових формул виконується

Таблиця 12.3. *Приклад 2.* Алгоритм і приклад перевірного розрахунку циліндричної обичайки з урахуванням температурних напружень

№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Коефіцієнт товстостінності	$\beta = \frac{D + 2(S - C)}{D}$	$\beta = \frac{0,4 + 2(0,05 - 0,002)}{0,4} = 1,24$
2	Перепад температур	$\Delta t = t_6 - t_3$	$\Delta t = 100 - 20 = 80 \text{ } ^\circ\text{C} > 0$
3	Коефіцієнти $K_1$ і $K_2$	$K_1 = \frac{\alpha_t E}{1 - \mu} \left( \frac{\beta^2 - 1}{2 \ln \beta} - 1 \right) - \text{розраховується, якщо } \Delta t > 0$	$K_1 = \frac{1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 1,91 \cdot 10^5}{1 - 0,3} \left( \frac{1,24^2 - 1}{2 \ln 1,24} - 1 \right) = 0,95$
4	Еквівалентне напруження	$K_2 = \frac{\alpha_t E}{1 - \mu} \left( \frac{\beta^2 - 1}{2\beta^2 \ln \beta} - 1 \right) - \text{розраховується, якщо } \Delta t < 0$ $\sigma_{екв} = \frac{1}{\beta^2 - 1} \sqrt{3p^2 + 3pK_1\Delta t + K_1^2\Delta t^2},$ <p style="text-align: center;">якщо <math>\Delta t &gt; 0</math>;</p> $\sigma_{екв} = \frac{\beta^2}{\beta^2 - 1} \sqrt{3p^2 + 3pK_2\Delta t + K_2^2\Delta t^2},$ <p style="text-align: center;">якщо <math>\Delta t &lt; 0</math>.</p>	<p style="text-align: center;">–</p> $\sigma_{екв} = \frac{1}{1,24^2 - 1} \sqrt{3 \cdot 30^2 + 3 \cdot 30 \cdot 0,95 \cdot 80 + 0,95^2 80^2} = 230,2 \text{ МПа}$ <p style="text-align: center;">–</p>
5	Умова міцності	$\sigma_{екв} \leq \frac{\sigma_T}{1,1}$	$\sigma_{екв} = 230,2 \text{ МПа}$ $\frac{\sigma_T}{1,1} = \frac{240}{1,1} = 218,2 \text{ МПа}$ <p style="text-align: center;">Умова міцності не виконується</p>

Треба збільшити товщину стінки обичайки або замінити матеріал обичайки на такий, що має більший Е і зробити перерахунок. Для наведеного прикладу приймаємо товщину стінки обичайки S=0,06 м і продовжемо розрахунок			
6	Коефіцієнт товстостінності	$\beta = \frac{D + 2(S - C)}{D}$	$\beta = \frac{0,4 + 2(0,06 - 0,002)}{0,4} = 1,29$
7	Коефіцієнт $K_1$	$K_1 = \frac{\alpha_t E}{1 - \mu} \left( \frac{\beta^2 - 1}{2 \ln \beta} - 1 \right)$	$K_1 = \frac{1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 1,91 \cdot 10^5}{1 - 0,3} \left( \frac{1,29^2 - 1}{2 \ln 1,29} - 1 \right) = 1,16$
8	Еквівалентне напруження	$\sigma_{екв} = \frac{1}{\beta^2 - 1} \sqrt{3p^2 + 3pK_1 \Delta t + K_1^2 \Delta t^2}$	$\sigma_{екв} = \frac{1}{1,29^2 - 1} \sqrt{3 \cdot 30^2 + 3 \cdot 30 \cdot 1,16 \cdot 80 + 1,16^2 \cdot 80^2} = 211,2 \text{ МПа}$
9	Умова міцності	$\sigma_{екв} \leq \frac{\sigma_T}{1,1}$	$\sigma_{екв} = 211,2 \text{ МПа}$ $\frac{\sigma_T}{1,1} = \frac{240}{1,1} = 218,2 \text{ МПа}$ $211,2 \text{ МПа} < 218,2 \text{ МПа}$ <p>Умова міцності виконується</p>

### 13. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 17.

#### РОЗРАХУНОК ЗАТВОРІВ АПАРАТІВ ВИСОКОГО ТИСКУ

##### Література.

1. Андреев І.А., Зубрій О.Г. Конструювання та розрахунок апаратів високого тиску, - К.: ІЗМН, 1999. – 144 с.
2. Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.-148 с.
3. Андреев І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

##### Завдання на 17 практичне заняття.

Розрахувати і порівняти затвори апаратів високого тиску.

Алгоритми і приклади розрахунків наведені у таблицях 13.1 – 13.5.

##### Початкові дані для прикладу розрахунку затвора з плоскою металевою прокладкою (табл.13.1).

Корпус і кришка – ковані.

Матеріал корпусу – сталь 09Г2С.

Матеріал кришки – сталь 20.

Матеріал прокладки – алюміній.

Внутрішній діаметр корпусу  $D$ .....0,4 м.

Внутрішній діаметр ущільнення  $D_1$  .....0,42 м.

Розрахунковий внутрішній тиск  $p$ .....30 МПа.

Мінімальне значення границі плинності матеріалу корпусу при розрахунковій температурі  $\sigma_{т.корп.}$  .....240 МПа.

Мінімальне значення границі плинності матеріалу кришки при розрахунковій температурі  $\sigma_{т.кр.}$  .....213 МПа.

Допустиме напруження матеріалу корпусу при розрахунковій температурі  $[\sigma]$ .....160 МПа.

**Початкові дані для прикладу розрахунку затвора з двоконусним кільцем (табл.13.2).**

Корпус і кришка – ковані.

Матеріал двоконусного кільця – сталь 22Х3М.

Внутрішній діаметр корпусу  $D$ .....0,4 м.

Розрахунковий внутрішній тиск  $p$ .....30 МПа.

Кут нахилу ущільнювальної поверхні корпусу або кришки посудини до вертикалі  $\gamma$ .....30°.

**Початкові дані для прикладу розрахунку затвора з кільцем трикутного перерізу (табл.13.3).**

Корпус і кришка – ковані.

Матеріал кільця – сталь 22Х3М.

Внутрішній діаметр корпусу  $D$ .....0,4 м.

Розрахунковий внутрішній тиск  $p$ .....30 МПа.

**Початкові дані для розрахунку затвора з трапецієдальною прокладкою(табл.13.4).**

Корпус і кришка – ковані.

Матеріал ущільнювального кільця – алюміній.

Внутрішній діаметр корпусу  $D$ .....0,4 м.

Розрахунковий діаметр ущільнювальної поверхні  $D_R$ .....0,42 м.

Розрахунковий внутрішній тиск  $p$ .....30 МПа.

**Початкові дані для розрахунку затвора з клиновим ущільненням(табл.13.5).**

Корпус і кришка – ковані.

Розрахунковий діаметр ущільнювальної поверхні (діаметр дотику)

$D_R$ .....0,42 м.

Розрахунковий внутрішній тиск  $p$ .....30 МПа.

Кут тертя (корпус і кришка – сталеві)  $\rho$ .....8 °.

Кут нахилу ущільнювальної поверхні корпусу до вертикалі  
 $\gamma$ .....11 ° 30 '.

Таблиця 13.1. Алгоритм і приклад розрахунку затвора з плоскою металевою прокладкою

№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Мінімальне значення границі плинності матеріалу поверхні, що ущільнюється, при розрахунковій температурі	$\sigma_{T.K} = \min\{\sigma_{T.корп.}; \sigma_{T.кр.}\}$	$\sigma_{T.K} = \min\{240; 213\} = 213 \text{ МПа}$
2	Допустиме контактне напруження на ущільнювальних поверхнях при розрахунковій температурі	$[\sigma]_K = 0,36\sigma_{T.K} + 180 \text{ МПа}$ Для пробного тиску замість $\sigma_{T.K}$ підставляють $\sigma_{T.K}^{20}$	$[\sigma]_K = 0,36 \cdot 213 + 180 = 256 \text{ МПа}$
3	Герметизуюче напруження зім'якшення прокладки для розрахункового тиску	$\sigma_n = \begin{cases} 70 \text{ МПа} - \text{для алюмінію}; \\ 100 \text{ МПа} - \text{для міді}; \\ 180 \text{ МПа} - \text{для сталі з } \sigma_{T.n}^{20} \leq 230 \text{ МПа} \end{cases}$ Для пробного тиску $\sigma_n$ приймається удвічі меншим герметизуючого напруження зім'якшення прокладки для розрахункового тиску	$\sigma_n = 70 \text{ МПа}$
4	Ширина плоскої прокладки	$b \geq \frac{0,25 p D_1}{[\sigma]_K - \sigma_{n-0,25p}}$	$b \geq \frac{0,25 \cdot 30 \cdot 0,42}{256 - 70 - 0,25 \cdot 30} = 0,018 \text{ м}$ Приймаємо $b = 0,02 \text{ м}$

Продовження табл.13.1

№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5	Розрахунковий діаметр ущільнювальної поверхні	$D_R = D_1 + b$	$D_R = 0,42 + 0,02 = 0,44 \text{ м}$
6	Осьове навантаження від дії тиску середовища на кришку	$F_Q = \frac{\pi D_R^2}{4} p$	$F_Q = \frac{3,14 \cdot 0,44^2}{4} 30 = 4,56 \text{ МН}$
7	Осьова реакція прокладки	$F_P = \pi D_R b \sigma_n$	$F_P = 3,14 \cdot 0,44 \cdot 0,02 \cdot 70 = 1,94 \text{ МН}$
8	Розрахункове зусилля, що діє на шпильки	$F = F_Q + F_P$	$F = 4,56 + 1,94 = 6,5 \text{ МН}$
9	Товщина прокладки	$S_{np} = \begin{cases} 0,005 \text{ м} & \text{для } 0,4 \text{ м} \leq D_1 \leq 0,5 \text{ м}; \\ 0,004 \text{ м} & \text{для } D_1 > 0,5 \text{ м} \end{cases}$	$S_{np} = 0,005 \text{ м}$

Таблиця 13.2. Алгоритм і приклад розрахунку затвора з двоконусним кільцем

№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Розрахунковий тиск з урахуванням впливу попереднього затягання при визначенні розрахункового зусилля	$p_F = \max\{p; 40 \text{ МПа}\}$	$p_F = \max\{30; 40\} = 40 \text{ МПа}$
2	Основні розміри ущільнення	$h_1$ і $h_2$ визначаються за табл. Е.1 додатка Е залежно від внутрішнього діаметра корпусу	$h_1 = 0,045 \text{ м}; \quad h_2 = 0,022 \text{ м}$



Продовження табл.13.2

№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
3	Розрахунковий діаметр ущільнювальної поверхні	$D_R = D + \frac{h_1 - h_2}{2} \operatorname{tg} \gamma$	$D_R = 0,4 + \frac{0,045 - 0,022}{2} \operatorname{tg} 30^\circ = 0,407 \text{ м}$
4	Висота кільця по середній лінії ущільнювальної поверхні	$h_R = \frac{h_1 + h_2}{2}$	$h_R = \frac{0,045 + 0,022}{2} = 0,0335 \text{ м}$
5	Осьове навантаження від дії тиску середовища на кришку	$F_Q = \frac{\pi D_R^2}{4} p$	$F_Q = \frac{3,14 \cdot 0,407^2}{4} 30 = 3,9 \text{ МН}$
6	Осьова реакція ущільнювального кільця	$F_P = 0,5 \pi p_F D_R h_R \operatorname{tg} \gamma$	$F_P = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 0,407 \cdot 0,0335 \cdot \operatorname{tg} 30^\circ = 0,5 \text{ МН}$
7	Розрахункове зусилля, що діє на шпильки	$F = F_Q + F_P$	$F = 3,9 + 0,5 = 4,4 \text{ МН}$

Таблиця 13.3. Алгоритм і приклад розрахунку затвора з кільцем трикутного перерізу

№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Геометричні розміри ущільнювального кільця	$D_R, h_o, \gamma$ визначаються за табл. Е.2 додатка Е залежно від внутрішнього діаметра корпусу	$D_R = 0,432 \text{ м}; \quad h_o = 0,016 \text{ м}; \quad \gamma = 47^\circ$
2	Осьова реакція ущільнювального кільця	$F_P = 0,5 \pi D_R h_o p \operatorname{tg} \gamma$	$F_P = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,432 \cdot 0,016 \cdot 30 \cdot \operatorname{tg} 47^\circ = 0,35 \text{ МН}$

Продовження табл.13.3

3	Осьове навантаження від дії тиску середовища на кришку	$F_Q = \frac{\pi D_R^2}{4} p$	$F_Q = \frac{3,14 \cdot 0,432^2}{4} 30 = 4,4 \text{ МН}$
4	Розрахункове зусилля, що діє на шпильки	$F = F_Q + F_P$	$F = 4,4 + 0,35 = 4,75 \text{ МН}$

Таблиця 13.4. Алгоритм і приклад розрахунку затвора з трапецоїдальною прокладкою

№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Розміри трапецоїдальної прокладки	$b, h_o, \gamma_1$ визначаються за табл. Е.3 додатка Е залежно від внутрішнього діаметра корпусу	$b \geq 0,006 \text{ м};$ приймаємо $b = 0,008 \text{ м};$ $h_o = 0,01 \text{ м}; \quad \gamma_1 = 45^\circ$
2	Прокладочний коефіцієнт	$m = \begin{cases} 2,75 - \text{для міді}; \\ 4 - \text{для алюмінію}; \\ 6 - \text{для сталі} \end{cases}$	$m = 4$
3	Кут тертя	$\rho = \begin{cases} 15^\circ - \text{для сталі по алюмінію}; \\ 12^\circ - \text{для сталі по міді}; \\ 8^\circ - \text{для сталі по сталі} \end{cases}$	$\rho = 15^\circ$

№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
4	Осьова реакція проклад- ки	$F_P = \frac{m p \pi D_R h_o \sin(\gamma_1 + 2\rho)}{\cos \rho \cos(\gamma_1 + \rho)}$	$F_P = \frac{4 \cdot 30 \cdot 3,14 \cdot 0,42 \cdot 0,01 \sin(45^\circ + 2 \cdot 15^\circ)}{\cos 15^\circ \cos(45^\circ + 15^\circ)} =$ $= 3,17 \text{ MH}$
5	Осьове навантаження від дії тиску середовища на кришку	$F_Q = \frac{\pi D_R^2}{4} p$	$F_Q = \frac{3,14 \cdot 0,42^2}{4} 30 = 4,16 \text{ MH}$
6	Розрахункове зусилля герметизації	$F = F_P + F_Q$	$F = 3,17 + 4,16 = 7,33 \text{ MH}$

Таблиця 13.5. Алгоритм і приклад розрахунку затвора з клиновим ущільненням

№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Досвідний коефіцієнт x	$x = \begin{cases} 1,1 & \text{для } \gamma = 5^\circ 30'; \\ 1,5 & \text{для } \gamma = 11^\circ 30' \end{cases}$	$x = 1,5$
2	Монтажне зусилля зтя- гання шпильок	$F_{u1} = 1,25 p \frac{\pi D_R^2}{4} x \frac{\sin(\gamma + \rho)}{\cos \rho}$	$F_{u1} = 1,25 \cdot 30 \frac{3,14 \cdot 0,42^2}{4} 1,5 \frac{\sin(11,5^\circ + 8^\circ)}{\cos 8^\circ} =$ $= 2,63 \text{ MH}$

Продовження табл.13.5

№№ п/п	Розрахункова величина	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
3	Осьове навантаження від дії тиску середовища на кришку	$F_Q = \frac{\pi D_R^2}{4} p$	$F_Q = \frac{3,14 \cdot 0,42^2}{4} 30 = 4,16 \text{ МН}$
4	Досвідний коефіцієнт $C_x$	$C_x = \begin{cases} 0,25 & \text{для } \gamma = 5^\circ 30'; \\ 0,4 & \text{для } \gamma = 11^\circ 30' \end{cases}$	$C_x = 0,4$
5	Зусилля герметизації на шпильки у робочих умовах	$F_{u2} = F_Q + C_x F_{u1}$	$F_{u2} = 4,16 + 0,4 \cdot 2,63 = 5,21 \text{ МН}$
6	Розрахункове зусилля герметизації	$F = \max\{F_{u1}; F_{u2}\}$	$F = \max\{2,63; 5,21\} = 5,21 \text{ МН}$

## **14. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 18-22. РОЗРАХУНОК ПРЕСОВОГО ВАЛА З ПОКРИТТЯМ**

Пресові вали зазвичай покривають гумою (гладкий гумований вал, жолобчатий вал, вал з глухими отворами), стонітом, або поліуретаном.

### **Література**

1. Алгоритм розрахунку пресів папероробної машини. Методичні вказівки до застосування обчислювальної техніки при курсовому та дипломному проектуванні для студентів інженерно-хімічного факультету спеціалізації 7.090219 «Обладнання лісового комплексу» / Укладачі В.М. Марчевський, О.Л. Свечков. – Київ: НТУУ «КПІ», 2003. – 20 с.

2. В. А. Чичаев, М. Л. Глезин, В. А Екімова и др. Оборудование целлюлозно-бумажного производства. В 2-х томах. Том 2. Бумагоделательные машины / Чичаев А.А., М. Л. Глезин, В. А Екімова – М.: Лесная промышленность, 1981. – 264 с.

3. Технология целлюлозно-бумажного производства: Справ. материалы: В 3 т. Т. 2, ч. 1: Производство бумаги и картона. ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона / [В.И. Комаров и др.]. - 2005 (Петрозаводск: ГП Тип. им. П.Ф. Анохина). - 423 с.

### **Завдання на практичне заняття**

Перевірити відповідність нижнього пресового вала умовам міцності та жорсткості, а також розрахувати його бомбіровку.

Умови: пресовий вал гумований, нижній, огинається сукном. Зверху до поверхні вала притискається інший пресовий вал без сукна (наприклад, гранітний).

Основні вихідні дані згідно таблиці 14.1. Додаткові вихідні дані згідно алгоритму/прикладу розрахунку, наведеному в таблиці 14.2.

Таблиця 14.1 Завдання на розрахунок згідно номеру варіанта

№	Маса нижнього вала $m_{\text{н}}$ , кг	Маса верхнього вала $m_{\text{в}}$ , кг	Необхідне притискання верхнього вала на нижній $P_{\text{пр}}$ , Н
1	7000	7250	30000
2	7250	7500	35000
3	7500	7750	40000
4	7750	8000	45000
5	8000	8250	50000
6	8250	8500	55000
7	8500	8750	60000
8	8750	9000	65000
9	9000	9250	70000
10	9250	9500	75000
11	9500	9750	80000
12	9750	10000	85000
13	10000	10250	90000
14	10250	10500	95000
15	10500	10750	100000
16	10750	11000	105000
17	11000	11250	110000
18	11250	11500	115000
19	11500	11750	120000
20	11750	12000	125000

Таблиця 14.2. Алгоритм і приклад розрахунку

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
<p align="center"><b>Розрахунок на міцність</b></p> <p>Мета розрахунку: розрахувати напруження, які діють на нижній пресовий вал і порівняти їх з допустимими.</p> <p>Схема навантаження на нижній пресовий вал показана на рисунку 14.1.</p> <div align="center"> </div> <p align="center">1 – нижній пресовий вал; 2 – верхній пресовий вал</p> <p align="center">Рис. 14.1. Схема навантаження на нижній вал</p>			
1.	Сила натягу сукна $S_c$	$S_c = S_0 b_0,$ <p>де <math>S_0</math> – питомий натяг сукна, кН/м;  <math>b_0</math> – ширина сукна, м</p>	$S_c = 4 \cdot 4,6 = 18,4 \text{ кН}$

2.	Інтенсивність навантаження на нижній вал від натягу сукна $Q_S$	$Q_S = 2S_C \cos \alpha$ , де $\alpha$ – кут між натягнутим сукном та вертикаллю, град.	$Q_S = 2 \cdot 18,4 \cdot \cos 50^\circ = 23,7 \text{ кН}$
3	Сумарне навантаження на вал $Q$	$Q = G_{\text{НВ}} + Q_S + q_{\text{Л}}B =$ $= G_{\text{НВ}} + Q_S + P_{\text{ПР}} + G_{\text{ВВ}}$ де $G_{\text{НВ}}$ – сила тяжіння нижнього валу, кН; $P_{\text{ПР}}$ – сила притискання верхнього валу, кН; $G_{\text{ВВ}}$ – сила тяжіння верхнього валу, кН	$Q = 100 + 23,7 + 240 + 105 = 469 \text{ кН}$
4	Момент інерції вала $I$	$I = \frac{\pi}{64} (D_1^4 - D_{\text{ВН}}^4)$ де $D_1$ – зовнішній діаметр вала без врахування гумового облицювання, м; $D_{\text{ВН}}$ – внутрішній діаметр вала, м	$I = \frac{3,14}{64} (1,46^4 - 1,35^4) = 0,06 \text{ м}^4$
5	Момент опору в перерізі I – I оболонки вала $W_I$	$W_1 = \frac{2I}{D_1}$	$W_1 = \frac{2 \cdot 0,06}{1,46} = 0,082 \text{ м}^3$
6	Момент опору цапфи вала в перерізі II – II оболонки вала $W_2$	$W_2 = 0,1d^3$ де $d$ – діаметр цапфи у перерізі II – II, м;	$W_2 = 0,1 \cdot 0,62^3 = 0,024 \text{ м}^3$



7	Момент опору цапфи вала в перерізі III – III оболонки вала $W_3$	$W_3 = 0,1d_1^3$ де $d_1$ – діаметр цапфи у перерізі III – III, м	$W_3 = 0,1 \cdot 0,4^3 = 0,0064 \text{ м}^3$
8	Згинальний момент у перерізі I – I $M_1$	$M_1 = Q \left( \frac{L}{4} - \frac{B}{8} \right)$ де $L$ – відстань між осями опор вала, м; $B$ – ширина робочої частини вала, м	$M_1 = 469 \cdot \left( \frac{5,8}{4} - \frac{4,6}{8} \right) = 410,4 \text{ кН} \cdot \text{м}$
9	Згинальний момент у перерізі II – II $M_2$	$M_2 = Q \left( \frac{L - B}{4} \right)$	$M_2 = 469 \cdot \left( \frac{5,8 - 4,6}{4} \right) = 140,7 \text{ кН} \cdot \text{м}$
10	Згинальний момент у перерізі III – III $M_3$	$M_3 = \frac{QC}{2}$ де $C$ – відстань від центру підшипника до перерізу III – III, м	$M_3 = \frac{469 \cdot 0,38}{2} = 89,11 \text{ кН} \cdot \text{м}$
11	Напруження при згинанні у перерізі I – I $\sigma_1$	$\sigma_1 = \frac{M_1}{W_1}$	$\sigma_1 = \frac{410,4}{0,082} = 5005 \text{ кПа}$
12	Напруження при згинанні у перерізі II – II $\sigma_2$	$\sigma_2 = \frac{M_2}{W_2}$	$\sigma_2 = \frac{140,7}{0,024} = 5863 \text{ кПа}$

13	Напруження при згинанні у перерізі III – III $\sigma_3$	$\sigma_3 = \frac{M_3}{W_3}$	$\sigma_3 = \frac{M_3}{W_3} = \frac{89,11}{0,0064} = 13923 \text{ кПа}$
14	Умова міцності	$\sigma_1 \leq [\sigma_B],$ $\sigma_2 \leq [\sigma_{\text{ц}}],$ $\sigma_3 \leq [\sigma_{\text{ц}}],$ де $[\sigma_B]$ – допустиме напруження матеріалу оболонки вала, МПа; $[\sigma_{\text{ц}}]$ – допустиме напруження цапф, МПа	5 МПа < 180 МПа, 5,86 МПа < 250 МПа, 13,9 МПа < 250 МПа
<p style="text-align: center;"><b>Розрахунок на жорсткість</b></p> <p>Мета розрахунку: розрахувати прогин та напруження і порівняти з допустимими значеннями при заданих параметрах вала.</p>			
15	Прогин вала $f$	$f = \frac{QB^2}{384EI} (12L - 7B)$ де $E$ – модуль пружності для матеріалу оболонки вала, Па	$f = \frac{469 \cdot 10^3 \cdot 4,6^2 \cdot (12 \cdot 5,8 - 7 \cdot 4,6)}{384 \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \cdot 0,06} =$ $= 1,074 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
16	Відносний прогин вала $\xi$	$\xi = \frac{f}{B}$	$\xi = \frac{1,074 \cdot 10^{-4}}{4,6} = 2,335 \cdot 10^{-5}$

17	Умова жорсткості вала	$\xi < [\xi]$ де $[\xi] = 15 \cdot 10^{-5}$ – допустимий відносний прогин вала	$2,335 \cdot 10^{-5} < 15 \cdot 10^{-5}$
Висновок: відносний прогин вала менший за допустимий відносний прогин, тобто конструкція нижнього пресового вала відповідає умові жорсткості.			
<b>Розрахунок вала на критичне число обертів</b>			
Мета розрахунку: визначити робоче і критичне число обертів вала.			
18	Прогин вала під дією навантаження $f_{\text{ст}}$	$f_{\text{ст}} = \frac{5G_{\text{HB}}L^3}{384EI}$	$f_{\text{ст}} = \frac{5 \cdot 100 \cdot 5,8^3}{384 \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \cdot 0,06} =$ $= 2,822 \cdot 10^{-8} \text{ м}$
19	Критична частота обертання $n_{\text{кр}}$	$n_{\text{кр}} = \frac{30}{\sqrt{f_{\text{ст}}}}$	$n_{\text{кр}} = \frac{30}{\sqrt{2,822 \cdot 10^{-8}}} = 178584 \text{ хв}^{-1} =$ $= 2976 \text{ с}^{-1}$
20	Робоче число обертів $n_{\text{р}}$	$n_{\text{р}} = \frac{V}{\pi D}$ де $V$ – швидкість папероробної машини, м/с; $D$ – зовнішній діаметр вала з врахуванням гумового облицювання, м	$n_{\text{р}} = \frac{7,5}{3,14 \cdot 1,5} = 1,592$

21	Умова відсутності явища резонансу $n_p$	$n_p < 0,7n_{кр}$	$1,592 < 0,7 \cdot 2976;$ $1,592 < 2083$
Висновок: за результатами розрахунку визначено число обертів, яке є значно меншим за критичне, що свідчить про відсутність явища резонансу.			
<b>Визначення довговічності підшипників</b>			
Мета розрахунку: перевірити за динамічною вантажопідйомністю ресурс попередньо обраних підшипників.			
22	Попередньо обирається підшипник		Наприклад, роликовий дворядний сферичний підшипник кочення 23980 ССК/W33
23	Приведене навантаження на один підшипник $Q_{пр}$	$Q_{пр} = \frac{Q}{2} (XK_K + 0,1Y)K_TK_b$ <p>де <math>X</math> – коефіцієнт радіального навантаження; <math>K_K</math> – коефіцієнт обертання; <math>Y</math> – коефіцієнт осьового навантаження; <math>K_T</math> – коефіцієнт температурний; <math>K_b</math> – коефіцієнт безпеки</p>	$Q_{пр} = \frac{469}{2} (1 \cdot 1 + 0,1 \cdot 2,642) \cdot 1 \cdot 1,2$ $= 356 \text{ кН}$

24	Довговічність підшипника, в обертах $L^0$	$L^0 = \left( \frac{C}{Q_{\text{пр}}} \right)^{\frac{10}{3}}$ <p>де <math>C</math> – динамічна вантажо-підйомність підшипника, кН</p>	$L^0 = \left( \frac{2000}{356} \right)^{\frac{10}{3}} = 315 \text{ млн. об}$
25	Довговічність підшипника, годинна $L_n$	$L_n = \frac{L^0}{n_p}$	$L_n = \frac{315 \cdot 10^6}{3600 \cdot 1,592} = 54962 \text{ год}$

### Розрахунок бомбіровки вала

Мета розрахунку: визначити геометрію поверхні оболонки пресового вала (бомбіровку вала).

Схема навантаження на оболонку пресового вала зображено на рисунку 14.2.

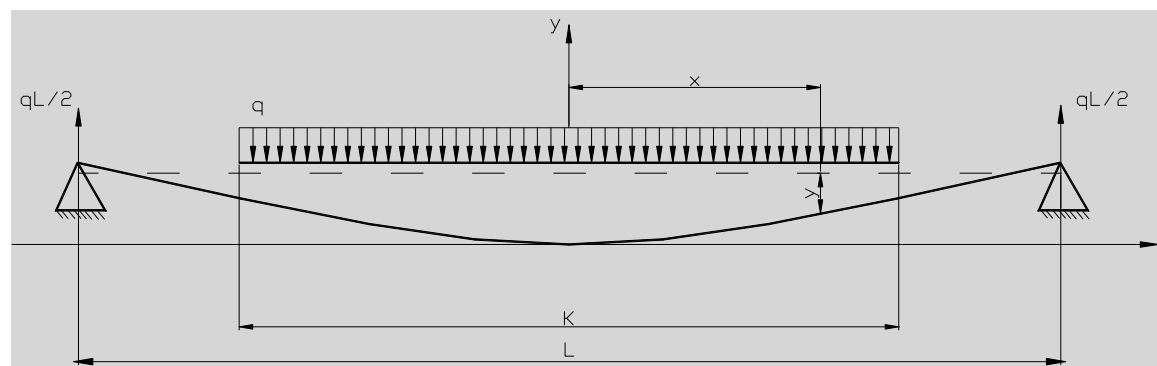


Рис. 14.2. Схема навантаження на пресовий вал

Значення бомбірування відповідає прогину вала в даній точці. Розбиваємо довжину оболонки вала на рівну кількість відрізків  $n$ . Для більш точного профілю оболонки кількість розбиттів потрібно збільшити.

26	Довжина кроку $\Delta x$	$\Delta x = \frac{B}{n}$ <p>де <math>B</math> – довжина бочки (оболонки) валу, м</p>	$\Delta x = \frac{4,6}{46} = 0,1 \text{ м}$
27	Координати точок по осі абсцис (за довжиною оболонки) $x$	$x_i = i \cdot \Delta x;$ <p><math>i</math> – номер точки розбиття валу</p>	$x_0 = 0 \cdot 0,1 = 0 \text{ м}$ $x_1 = 1 \cdot 0,1 = 0,1 \text{ м}$
28	Координата середини оболонки $x_{max}$	$x_{max} = x_{n/2} = n/2 \cdot \Delta x$	$x_{max} = x_{\frac{46}{2}=23} = 23 \cdot 0,1 = 2,3 \text{ м}$
29	Значення бочкоподібності оболонки в крайніх її точках (рівне прогину в цій точці) $y$	$y_0 = y_{46} = \frac{q_l x_0^2 (6LB - 3B^2 - 2x_0^2)}{48EI},$ <p>де <math>q_l</math> – лінійний тиск, що діє на оболонку:</p> $q_l = \frac{Q}{B}$	$y_0 = y_{46} = \frac{101957 \cdot 0^2 \cdot (6 \cdot 5,8 \cdot 4,6 - 3 \cdot 4,6^2 - 2 \cdot 0^2)}{48 \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \cdot 0,06} = 0 \text{ м},$ <p>де</p> $q_l = \frac{469 \cdot 10^3}{4,6} = 101957 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$

Продовження табл. 14.2

30	Значення бочкоподібності оболонки в проміжних її точках (рівне прогину в цих точках) у	$y_i = y_{n-i} = \frac{q_L x_i^2 (6LB - 3B^2 - 2x_{46}^2)}{48EI}$	$y_1 = y_{45} =$ $= \frac{101957 \cdot 0,1^2 \cdot (6 \cdot 5,8 \cdot 4,6 - 3 \cdot 4,6^2 - 2 \cdot 0,1^2)}{48 \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \cdot 0,06}$ $= 2,2794 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$ <p>Аналогічно визначається для всіх інших точок</p>
31	Значення бочкоподібності оболонки на її середині (рівне прогину в цій точці, максимальний прогин облонки) у	$y_{23} = y_{max} = \frac{q_L x_{46}^2 (6LB - 3B^2 - 2x_{46}^2)}{48EI}$	$y_{max} = y_{23} =$ $= \frac{101957 \cdot 4,6^2 \cdot (6 \cdot 5,8 \cdot 4,6 - 3 \cdot 4,6^2 - 2 \cdot 4,6^2)}{48 \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \cdot 0,06}$ $= 0,0001074 \text{ м}$

## **15. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 23-27. РОЗРАХУНОК ТРУБЧАСТОГО ВАЛА**

Трубчасті вали використовуються найчастіше в якості грудних, реєстрових, сукно-, сітко- та папероведучих валів.

### **Література**

1. В. А. Чичаев, М. Л. Глезин, В. А. Екімова и др. Оборудование целлюлозно-бумажного производства. В 2-х томах. Том 2. Бумагоделательные машины / Чичаев А.А., М. Л. Глезин, В. А. Екімова – М.: Лесная промышленность, 1981. – 264 с.
2. Технология целлюлозно-бумажного производства: Справ. материалы: В 3 т. Т. 2, ч. 1: Производство бумаги и картона. ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона / [В.И. Комаров и др.]. - 2005 (Петрозаводск: ГП Тип. им. П.Ф. Анохина). - 423 с.
3. Расчеты на прочность валов сеточной части бумагоделательных машин. Методические указания по применению вычислительной техники в курсе «Расчеты и конструирование бумагоделательных и отделочных машин» для студентов специальности 17.04 факультета химического машиностроения / Сост. Н.В. Казачинская. Киев: КПИ, 1990. – 32 с.

### **Завдання на практичне заняття**

Перевірити умови міцності та жорсткості трубчастого вала на прикладі грудного.

Умови експлуатації: грудний зверху вал огинається зверху сіткою. Оболонка валу гумована.

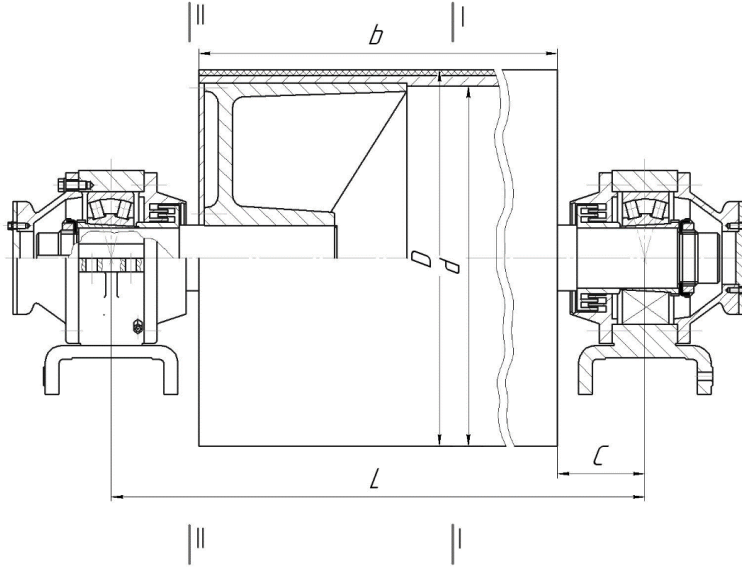
Вихідні дані згідно таблиці 15.1. Інші вихідні дані згідно алгоритму/прикладу розрахунку, наведеному в таблиці 15.2.



Таблиця 15.1 Завдання на розрахунок

№	Маса грудного вала $m_n$ , кг	Питомий натяг сітки $q$ , Н/м
1	2500	6800
2	2600	6600
3	2700	6400
4	2800	6200
5	2900	6000
6	3000	5800
7	3100	5600
8	3200	5400
9	3300	5200
10	3400	5000
11	3500	4800
12	3600	4600
13	3700	4400
14	3800	4200
15	3900	4000
16	4000	3800
17	4100	3600
18	4200	3400
19	4300	3200
20	4400	3000

Таблиця 15.2. Алгоритм і приклад розрахунку

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
<p align="center"><b>Розрахунок на міцність</b></p> <p>Мета розрахунку: розрахувати прогин та напруження і порівняти з допустимими значеннями при заданих параметрах вала.</p> <p>Схема грудного вала зображена на рисунку 15.1.</p>  <p align="center">Рис. 15.1. Схема грудного вала</p> <p>Схема навантаження показана на рисунку 15.2.</p>			

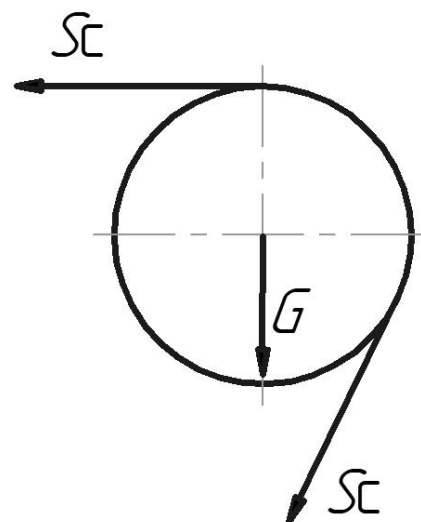


Рис. 15.2. Схема навантаження на грудний вал

1.	Навантаження від натягу сітки, що діє на вал $S_c$	$S_c = ql$ , де $q$ – питомий натяг сітки, Н/м; $l$ – ширина сітки, м	$S_c = 7000 \cdot 4,95 = 34650 \text{ Н}$
2.	Сила тяжіння грудного вала $G$	$G = mg$ , де $m$ – маса грудного вала, кг	$G = 2813 \cdot 9,81 = 27596 \text{ Н}$
3.	Сила тяжіння оболонки грудного вала $S_c$	$G_1 = m_1 g$ , де $m_1$ – маса оболонки грудного вала, кг	$G_1 = 1937 \cdot 9,81 = 19002 \text{ Н}$

4. Рівнодіюча сила, що діє на вал, визначається векторним способом за правилом багатокутника або за формулою

$$Q_1 = \sqrt{R_x^2 + R_y^2},$$

де  $R_x = S_c + S_c \sin \alpha$  – рівнодіюча сила від всіх діючих сил, спроектованих на вісь  $ox$ , Н;

$R_y = S_c \cos \alpha + G_1$  – рівнодіюча сила від всіх діючих сил, спроектованих на вісь  $oy$ , Н.

За правилом багатокутника схема визначення рівнодіючої сили матиме вигляд, показаному на рис. 15.3.

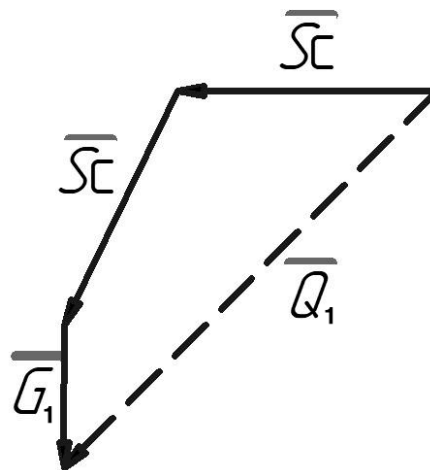


Рис. 15.3. Схема визначення рівнодіючої сили, що діє на грудний вал

- |    |                                |                                       |                         |
|----|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| 5. | Визначення<br>рівнодіючої сили | Векторним способом згідно рис.<br>2.5 | $Q_1 = 74147 \text{ Н}$ |
|----|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|

6.	Реакція в опорах (в підшипниках) $R$	$R = \frac{Q_1}{2}$	$R = \frac{74147}{2} = 37074 \text{ Н}$
7.	Момент інерції вала $I$	$I = \frac{\pi}{64} (D_1^4 - d^4),$ де $D_1$ – зовнішній діаметра оболонки без гумування, м; $d$ – внутрішній діаметр оболонки, м	$I = \frac{3,14}{64} (0,78^4 - 0,74^4) = 0,00345 \text{ м}^4$
8.	Момент опору в перерізі I – I оболонки вала $W_1$	$W_1 = \frac{2I}{D_1}$	$W_1 = \frac{2 \cdot 0,00345}{0,78} = 0,00885 \text{ м}^3$
9.	Згинальний момент у перерізі I – I оболонки вала $M_1$	$M_1 = Q_1 \cdot \left( \frac{L}{4} - \frac{B}{8} \right),$ де $L$ – відстань між опорами валу, м; $B$ – довжина оболонки валу, м	$M_1 = 74147 \cdot \left( \frac{5,53}{4} - \frac{5,1}{8} \right) = 55240 \text{ Н} \cdot \text{м}$
10.	Напруження при згинанні у перерізі I – I оболонки вала $\sigma_1$	$\sigma_1 = \frac{M_1}{W_1}$	$\sigma_1 = \frac{55240}{0,00885} = 6242808 \text{ Па} \approx 6,2 \text{ МПа}$
11.	Допустима границя концентрації напруження в оболонці вала $[K_\sigma]_д$	$[K_\sigma]_д = \frac{K_\sigma + K_\sigma^n - 1}{\varepsilon_\sigma},$ де $K_\sigma, K_\sigma^n, \varepsilon_\sigma$ – емпіричні коефіцієнти	$[K_\sigma]_д = \frac{1,5 + 1,05 - 1}{0,54} = 2,87$

12.	Межа стійкості оболонки вала $[\sigma_{-1}]_д$	$[\sigma_{-1}]_д = \frac{\sigma_{-1}}{[K_\sigma]_д},$ де $\sigma_{-1}$ – межа стійкості матеріалу оболонки, МПа; $[K_\sigma]_д$ – допустима межа концентрацій напруження	$[\sigma_{-1}]_д = \frac{130}{2,87} = 45,3 \text{ МПа}$
13.	Момент опору в перерізі цапфи вала у перерізі II – II $W_2$	$W_2 = 0,1 \cdot d^3$ де $d$ – діаметр цапфи у перерізі II – II, м	$W_2 = 0,1 \cdot 0,14^3 = 0,000274 \text{ м}^3$
14.	Згинальний момент цапфи вала у перерізі II – II $M_2$	$M_2 = Rc$ де $c$ – відстань від центру підшипника до перерізу II – II	$M_2 = 37074 \cdot 0,21 = 7786 \text{ Н} \cdot \text{м}$
15.	Напруження при згинанні цапфи вала у перерізі II – II $\sigma_2$	$\sigma_2 = \frac{M_2}{W_2}$	$\sigma_2 = \frac{7786}{0,000274} = 28416058 \text{ Па} \approx 28,4 \text{ МПа}$
16.	Допустима границя концентрації напруження в цапфі вала $[K_\sigma]_{дц}$	$[K_\sigma]_{дц} = \frac{K_{\sigma_{ц}} + K_{\sigma_{ц}}^n - 1}{\varepsilon_{\sigma_{ц}}}$	$[K_\sigma]_{дц} = \frac{1,7 + 1 - 1}{0,68} = 2,5$
17.	Границя стійкості цапфи вала $[\sigma_{-1}]_{дц}$	$[\sigma_{-1}]_{дц} = \frac{\sigma_{-1ц}}{[K_\sigma]_{дц}}$	$[\sigma_{-1}]_{дц} = \frac{550}{2,5} = 220 \text{ МПа}$

18.	Умови міцності для оболонки та цапфи вала відповідно	$\sigma_1 \leq [\sigma_{-1}]_д,$ $\sigma_2 \leq [\sigma_{-1}]_{дц},$ <p>де <math>[\sigma_B]</math> – допустиме напруження матеріалу оболонки вала, МПа, <math>[\sigma_{ц}]</math> – допустиме напруження цапф, МПа</p>	$6,2 \text{ МПа} < 45,3 \text{ МПа},$ $28,4 \text{ МПа} < 220 \text{ МПа},$
19.	Висновок: умови міцності вала виконуються, оскільки розраховане значення напруження під час згинання є значно меншими за значення допустимих напружень		
<b>Розрахунок на жорсткість</b>			
Мета розрахунку: розрахувати прогин та напруження і порівняти з допустимими значеннями при заданих параметрах вала.			
20	Прогин вала (посередині) $f$	$f = \frac{Q_1 B^2}{384EI} (12L - 7B)$ <p>де <math>E</math> – модуль пружності для матеріалу оболонки вала, Па</p>	$f = \frac{74147 \cdot 5,1^2 \cdot (12 \cdot 5,53 - 7 \cdot 5,1)}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,00345} =$ $= 21,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}$
21	Відносний прогин вала $\xi$	$\xi = \frac{f}{B}$	$\xi = \frac{21,25 \cdot 10^{-5}}{5,1} = 4,167 \cdot 10^{-5}$

22	Перевірка вала умові жорсткістю	$\xi < [\xi],$ де $[\xi]$ – максимально допустимий прогин грудного вала, $[\xi] = \frac{1}{15 \cdot 10^3} \cdots \frac{1}{20 \cdot 10^3} =$ $= 6,7 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-5}$	$4,167 \cdot 10^{-5} < 5 \cdot 10^{-5}$
23	Висновок: відносний прогин вала менший за допустимий відносний прогин, тобто конструкція грудного вала відповідає умові жорсткості.		

**Розрахунок вала на критичне число обертів**

Мета розрахунку: перевірити умову відсутності явища резонансу.

Рівнодіюча сила, що діє на вал, визначається векторним способом за правилом багатокутника або як

$$Q_1 = \sqrt{R_x^2 + R_y^2},$$

де  $R_x = S_c + S_c \sin \alpha$  – рівнодіюча сила від всіх діючих сил, спроектованих на вісь  $ox$ , Н;  
 $R_y = S_c \cos \alpha + G$  – рівнодіюча сила від всіх діючих сил, спроектованих на вісь  $oy$ , Н.

За правилом багатокутника схема визначення рівнодіючої сили матиме вигляд, показаному на рис. 15.4.

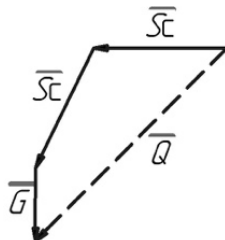


Рис. 15.4. Схема визначення загальної рівнодіючої сили



	Рівнодіюча сила, що діє на вал,	Векторним способом згідно рис. 2.6	$Q = 78482 \text{ Н}$
	Прогин вала під дією власної ваги $f_{\text{ст}}$	$f_{\text{ст}} = \frac{5GL^3}{384EI}$	$f_{\text{ст}} = \frac{5 \cdot 27596 \cdot 5,53^3}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,00345} = 8,387 \cdot 10^{-5} \text{ м}$
	Критична частота обертання вала $n_{\text{кр}}$	$n_{\text{кр}} = \frac{30}{\sqrt{f_{\text{ст}}}}$	$n_{\text{кр}} = \frac{30}{\sqrt{8,387 \cdot 10^{-5}}} = 3276 \text{ с}^{-1}$
	Частота обертання вала $n$	$n = \frac{V}{\pi D}$ де $V$ – швидкість папероробної машини, м/с	$n = \frac{10}{3,14 \cdot 0,8} = 3,979 \text{ с}^{-1}$
	Відношення робочої частоти обертання вала до критичної $K_0$	$K_0 = \frac{n_p}{n_{\text{кр}}}$	$K_0 = \frac{3,979}{3276} = 0,000121$
	Перевірка умови виникнення резонансу	$K_0 < 0,6$	$0,000121 < 0,6$
	Висновок: умова виникнення явища резонансу виконується.		

## **16. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 28-30. РОЗРАХУНОК ВІДСМОКТУВАЛЬНОГО ВАЛА**

Відсмоктувальні вали використовуються для часткового зневоднення паперового або картонного полотна в кінці сіткової частини або в якості пресового у складі гауч-преса, поворотного або комбі-преса.

### **Література**

1. В. А. Чичаев, М. Л. Глезин, В. А Екімова и др. Оборудование целлюлозно-бумажного производства. В 2-х томах. Том 2. Бумагоделательные машины / Чичаев А.А., М. Л. Глезин, В. А Екімова – М.: Лесная промышленность, 1981. – 264 с.
2. Технология целлюлозно-бумажного производства: Справ. материалы: В 3 т. Т. 2, ч. 1: Производство бумаги и картона. ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона / [В.И. Комаров и др.]. - 2005 (Петрозаводск: ГП Тип. им. П.Ф. Анохина). - 423 с.
3. Расчеты на прочность валов сеточной части бумагоделательных машин. Методические указания по применению вычислительной техники в курсе «Расчеты и конструирование бумагоделательных и отделочных машин» для студентов специальности 17.04 факультета химического машиностроения / Сост. Н.В. Казачинская. Киев: КПИ, 1990. – 32 с.

### **Завдання на практичне заняття**

Перевірити умови міцності та жорсткості оболонки відсмоктувального вала.

Умови експлуатації: відсмоктувальний знаходиться наприкінці сіткової частини папероробної машини та огинається сіткою. Всередині вала знаходиться однокамерна вакуум-камера.

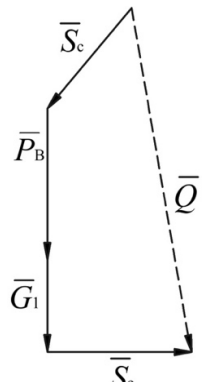
Вихідні дані згідно таблиці 16.1. Інші вихідні дані згідно алгоритму/прикладу розрахунку, наведеному в таблиці 16.2.

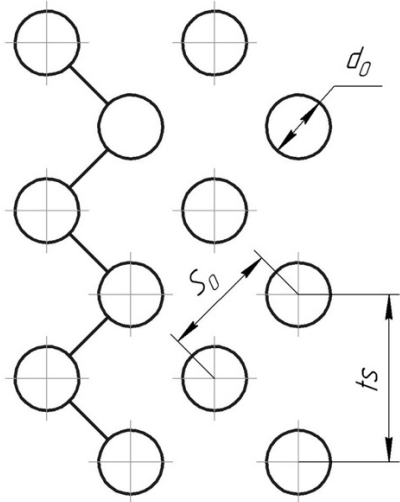
*Таблиця 16.1* Завдання на розрахунок

№	Маса вала $m_n$ , кг	Питомий натяг сітки $q$ , Н/м	Вакуум в камері $P_v$ , МПа
1	2500	6800	0,05
2	2600	6600	0,055
3	2700	6400	0,06
4	2800	6200	0,065
5	2900	6000	0,07
6	3000	5800	0,075
7	3100	5600	0,08
8	3200	5400	0,085
9	3300	5200	0,09
10	3400	5000	0,095
11	3500	4800	0,1
12	3600	4600	0,05
13	3700	4400	0,055
14	3800	4200	0,06
15	3900	4000	0,065
16	4000	3800	0,07
17	4100	3600	0,075
18	4200	3400	0,08
19	4300	3200	0,085
20	4400	3000	0,09

Таблиця 16.2 Алгоритм і приклад розрахунку

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
<p style="text-align: center;"><b>Розрахунок на міцність</b></p> <p>Мета розрахунку – перевірити оболонку відсмоктувального вала на міцність. Схема навантаження показана на рисунку 16.1.</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Рис. 16.1 Схема навантаження оболонки відсмоктувального вала</p> <p>Навантаження від притискання ущільнень стінок вакуумної камери підтримує оболонку та зменшує загальне на неї навантаження. Тому для встановлення максимально можливого навантаження (наприклад, за умови зношення ущільнень) притискання ущільнень не враховується.</p>			

1.	Навантаження від вакууму $P_1$	$P_1 = P_v b_1 l$ $b_1$ ширина зони відсмоктування; $l$ довжина зони відсмоктування; $P_v$ вакуум у вакуумній камері	$P_1 = 0,075 \cdot 10^6 \cdot 0,42 \cdot 4,8$ $= 151200 \text{ Н}$
2	Сила притискання сіткою $P_2$	$P_2 = qb$ де $b$ ширина сітки; $q$ натяг сітки, Н/м	$P_2 = qb = 5000 \cdot 4,8 = 24000 \text{ Н}$
3	Сила тяжіння оболонки відсмоктувального вала	$G = m_1 g$ де $m_1$ – маса оболонки грудного вала, кг	$G = 8590 \cdot 9,81 = 84268 \text{ Н}$
4	Результуюча сила навантаження	 <p>Рис. 16.2. Схема визначення рівнодіючої сили (кут огинання вала сіткою складає <math>\alpha = 40^\circ</math>)</p>	$Q_1 = 253998 \text{ Н}$ (векторним методом згідно рисунку 2.8)

5	Крок перфорацією оболонки $t_s$ між	 <p>Рис. 16.3. Схема перфорації оболонки відсмоктувального вала (ломаною лінією зображено небезпечний переріз)</p> $t_s = \frac{\pi D}{n}$ <p>де <math>n</math> – кількість отворів, які потрапляють в поперечний переріз оболонки; <math>D</math> – діаметр оболонки, м</p>	$t_s = \frac{\pi \cdot 0,92}{60} = 0,048 \text{ м}$
6	Довжина ломаної лінії небезпечного перерізу $t_s'$	$t_s' = i(S_0 - d_0)$ <p><math>i</math> – кількість однакових відрізків, які складають ламану лінію; <math>S_0</math> – крок між отворами, м; <math>d_0</math> – діаметр отворів, м</p>	$t_s' = 5(15,9 - 8) = 0,0395 \text{ м}$

Продовження табл. 16.2

7	Приведений коефіцієнт послаблення поперечного перерізу оболонки перфорацією $\eta$	$\eta = \frac{t_s'}{t_s}$	$\eta = \frac{0,0395}{0,048} = 0,823$
8	Максимальний згинальний момент посередині оболонки вала	$M = Q_1 \left( \frac{L}{4} - \frac{l_2}{8} \right),$ де $L$ – довжина між опорами валу, м; $l_2$ – довжина оболонки валу, м	$M = 253998 \left( \frac{6,1}{4} - \frac{5}{8} \right) =$ $= 228598 \text{ Нм}$
9	Момент інерції перерізу оболонки валу без урахування перфорації $I$	$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$ $d$ – внутрішній діаметр оболонки, м	$I = 0,05 \cdot (0,92^4 - 0,806^4) =$ $= 0,0144 \text{ м}^4$
10	Момент опору перерізу оболонки валу $W$	$W = \frac{2I}{D}$	$W = \frac{2 \cdot 0,0147}{0,92} = 0,0314 \text{ м}^3$
11	Напруження згинання в оболонці валу $\sigma_{зг}$	$\sigma_{зг} = \frac{M}{W\eta}$	$\sigma_{зг} = \frac{228598}{0,0314 \cdot 0,823} = 8845919 \text{ Па}$ $\approx 8,85 \text{ МПа}$
12	Допустима границя концентрації напруження в оболонці вала $[K_\sigma]_д$	$[K_\sigma]_д = \frac{K_\sigma + K_\sigma^n - 1}{\varepsilon_\sigma},$ де $K_\sigma, K_\sigma^n, \varepsilon_\sigma$ – емпіричні коефіцієнти	$[K_\sigma]_д = \frac{2,1 + 1,05 - 1}{0,54} = 3,98$

13	Границя стійкості оболонки вала $[\sigma_{-1}]_д$	$[\sigma_{-1}]_д = \frac{\sigma_{-1}}{[K_\sigma]_д}$ де $\sigma_{-1}$ – межа стійкості для оболонки валу	$[\sigma_{-1}]_д = \frac{120}{3,98} = 30,15 \text{ МПа}$
14	Запас міцності за межею витривалості	$n = \frac{[\sigma_{-1}]_д}{\sigma_{3г}}$	$n = \frac{30,15}{8,85} = 3,42$
15	Перевірка умові міцності	$n \geq [n]_{min},$ де $[n]_{min} = 2,5 \dots 3$	$3,42 \geq 3$
16	Висновок: умова міцності виконується.		
<b>Розрахунок на жорсткість</b> Мета розрахунку: визначити прогин оболонки та порівняти з допустимими значеннями.			
17	Прогин вала:	$f = \frac{Q_1 l_2^2}{384EI(1 - k)} (12L - 7l_2)$	$f = \frac{253998 \cdot 5^2 \cdot (12 \cdot 6,1 - 7 \cdot 5)}{384 \cdot 1,15 \cdot 10^{11} \cdot (1 - 0,33)} = 8,198 \cdot 10^{-6} \text{ м}$
18	Відносний прогин вала	$\xi = \frac{f}{l_2}$	$\xi = \frac{0,82 \cdot 10^{-5}}{5} = 0,164 \cdot 10^{-5}$
19	Умова жорсткості вала	$\xi < [\xi],$ де $[\xi] = (6,7 \dots 5) \cdot 10^{-5}$ – допустимий прогин оболонки вала	$0,164 \cdot 10^{-5} < 5 \cdot 10^{-5}.$
20	Висновок: прогин оболонки вала менший за допустимий, тобто умова жорсткості виконується.		



## Додаток А. Механічні характеристики сталей

Властивості сталей подані за ГОСТ 14249-89

Таблиця А.І. Допустимі напруження для вуглецевих і низьколегованих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата	Допустиме напруження [σ], МПа, для сталей марок							
	Ст3		09Г2С, 16ГС		20, 20К	10	10Г2, 09Г2	17ГС, 17Г1С, 10Г2С1
	Товщина, мм							
	до 20	понад 20	до 32	понад 32	до 160			
20	154	140	196	183	147	130	180	183
100	149	134	177	160	142	125	160	160
150	145	131	171	154	139	122	154	154
200	142	126	165	148	136	118	148	148
250	131	120	162	145	132	112	145	145
300	115	108	151	134	119	100	134	134
350	105	98	140	123	106	88	123	123
375	93	93	133	116	98	82	108	116
400	85	85	122	105	92	77	92	105
410	81	81	104	104	86	75	86	104
420	75	75	92	92	80	72	80	92
430	71*	71*	86	86	75	68	75	86
440	—	—	78	78	67	60	67	78
450	—	—	71	71	61	53	61	71
460	—	—	64	64	55	47	55	64
470	—	—	56	56	49	42	49	56
480	—	—	53	53	46*	37	46**	53

\*Для розрахункової температури стінки 425 °С.

\*\* Для розрахункової температури стінки 475 °С.

*Примітки.* 1. Якщо розрахункові температури нижчі від 20 °С, допустимі напруження беруть такими самими, як і за температури 20 °С для допустимого застосування матеріалу за цієї температури.

2. Для проміжних розрахункових температур стінки допустиме напруження визначають лінійною інтерполяцією з округленням результатів до 0,5 МПа у бік меншого значення.

3. Для сталі марки 20, якщо  $R_T^{20} < 220$  МПа допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на відношення  $R_T^{20}/220$ .

4. Для сталі марки 10Г2, якщо  $R_T^{20} < 270$  МПа допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на відношення  $R_T^{20}/270$ .

Таблиця А.2. Допустимі напруження для теплотривких хромистих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$ , МПа, для сталей марок				
	12ХМ	12МХ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	147	147	155	146	240
100	146,5	146,5	153	141	235
150	146	146	152,5	138	230
200	145	145	152	134	225
250	145	145	152	127	220
300	141	141	147	120	210
350	137	137	142	114	200
375	135	135	140	110	180
400	132	132	137	105	170
410	130	130	136	103	160
420	129	129	135	101	150
430	127	127	134	99	140
440	126	126	132	96	135
450	124	124	131	94	130
460	122	122	127	91	126
470	117	117	122	89	122
480	114	114	117	86	118
490	105	105	107	83	114
500	96	96	99	79	108
510	82	82	84	72	97
520	69	69	74	66	85
530	60	57	67	60	72
540	50	47	57	54	58
550	41	—	49	47	52
560	33	—	41	40	45
570	—	—	—	35	40
580	—	—	—	30	34
590	—	—	—	28	30
600	—	—	—	25	25

Примітки до таблиці А.2. 1. Якщо розрахункові температури нижчі від 20 °С, допустимі напруження беруть такими самими, як за температури 20 °С для допустимого застосування матеріалу за цієї температури.

2. Для проміжних розрахункових температур стінки допустиме напруження визначають лінійною інтерполяцією з округленням результатів до 0,5 МПа у бік меншого значення.

3. Якщо розрахункові температури нижчі за 200 °С, сталь марок 12МХ, 12ХМ, 15ХМ застосовувати не рекомендується.

Таблиця А.3. Допустимі напруження для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного класу

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження [ $\sigma$ ], МПа, для сталей марок				
	03Х21Н21М4ГБ	03Х18Н11	03Х17Н14М3	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т
20	180	160	153	168	184
100	173	133	140	156	174
150	171	125	130	148	168
200	171	120	120	140	160
250	167	115	113	132	154
300	149	112	103	123	148
350	143	108	101	113	144
375	141	107	90	108	140
400	140	107	87	103	137
410	—	107	83	102	136
420	—	107	82	101	135
430	—	107	81	100,5	134
440	—	107	81	100	133
450	—	107	80	99	132
460	—	—	—	98	131
470	—	—	—	97,5	130
480	—	—	—	97	129
490	—	—	—	96	128
500	—	—	—	95	127
510	—	—	—	94	126
520	—	—	—	79	125
530	—	—	—	79	124
540	—	—	—	78	111
550	—	—	—	76	111
560	—	—	—	73	101
570	—	—	—	69	97
580	—	—	—	65	90
590	—	—	—	61	81
600	—	—	—	57	74
610	—	—	—	—	68
620	—	—	—	—	62
630	—	—	—	—	57
640	—	—	—	—	52
650	—	—	—	—	48
660	—	—	—	—	45
670	—	—	—	—	42
680	—	—	—	—	38
690	—	—	—	—	34
700	—	—	—	—	30

*Примітки.* 1. Якщо розрахункові температури нижчі від 20 °С, допустимі напруження беруть такими самими, як і за температури 20 °С для допустимого застосування матеріалу за цієї температури.

2. Для проміжних розрахункових температур стінки допустиме напруження визначають інтерполяцією двох найближчих значень, що зазначені в таблиці, з округленням результатів до 0,5 МПа у бік меншого значення.

3. Для поковок зі сталі марок 12X18H10T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T допустимі напруження, що зазначені в таблиці за температур до 550 °С, помножують на 0,83.

4. Для сортового прокату зі сталі марок 12X18H10T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T допустимі напруження, що зазначені в таблиці за температур до 550 °С, помножують на відношення  $R_{0,2}^*/240$ , де  $R_{0,2}^*$  – умовна границя плинності матеріалу сортового прокату, визначена за ГОСТ 5949; для сортового прокату зі сталі марки 03X18H11 допустиме напруження помножують на 0,8.

5. Для поковок і сортового прокату з сталі марки 08X18H10T допустимі напруження, що зазначені в таблиці за температур до 550 °С, помножують на 0,95.

6. Для поковок зі сталі марки 03X17H14M3 допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на 0,9.

7. Для поковок зі сталі марки 03X18H11 допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на 0,9; для сортового прокату з сталі марки 03X18H11 допустимі напруження помножують на 0,8.

8. Для труб зі сталі марки 03X21H21M4ГБ (ЗІ-35) допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на 0,88.

9. Для поковок зі сталі марки 03X21H21M4ГБ (ЗІ-35) допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на відношення  $R_{0,2}^*/250$ , де  $R_{0,2}^*$  – умовна границя плинності матеріалу поковок, визначена за ГОСТ 25054 (за погодженням).

Таблиця А.4. Допустимі напруження для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного та аустенітно-феритного класів

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$ , МПа, для сталей марок					
	08Х18Г8Н2Т (КО-3)	07Х13АГ20 (ЧС-46)	02Х8Н22С6 (ЭП-794)	15Х18Н12С4Т Ю (ЭИ-654)	06ХН28МДТ 03ХН28МДТ	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т
20	230	233	133	233	147	233
100	206	173	106,5	220	138	200
150	190	153	100	206,5	130	193
200	175	133	90	200	124	188,5
250	160	127	83	186,5	117	166,5
300	144	120	76,5	180	110	160
350	—	113	—	—	107	—
375	—	110	—	—	105	—
400	—	107	—	—	103	—

Примітки: 1. Якщо розрахункові температури нижчі від 20 °С, допустимі напруження беруть такими самими, як і за температури 20 °С для допустимого застосування матеріалу за цієї температури.

2. Для проміжних розрахункових температур стінки допустиме напруження визначають інтерполяцією двох найближчих значень, що зазначені в таблиці, з округленням результатів до 0,5 МПа в бік меншого значення.

Таблиця А.5. Розрахункові значення границі плинності для вуглецевих і низьколегованих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °C	Розрахункове значення границі плинності $R_t$ , МПа, для сталей марок							
	Ст3		09Г2С, 16ГС		20, 20К	10	10Г2, 09Г2	17ГС, 17Г1С, 10Г2С1
	Товщина, мм							
	до 20	понад 20	до 32	понад 32	до 160			
20	250	210	300	280	220	195	270	280
100	230	201	165,5	240	213	188	240	240
150	224	197	156,5	231	209	183	231	231
200	223	189	247,5	222	204	177	222	222
250	197	180	243	218	198	168	218	218
300	173	162	226,5	201	179	150	201	201
350	167	147	210	185	159	132	185	185
375	164	140	199,5	174	147	123	162	174
400	—	—	183	158	—	—	—	158
410	—	—	—	156	—	—	—	156
420	—	—	—	138	—	—	—	138

Таблиця А.6. Розрахункові значення границі міцності для вуглецевих і низьколегованих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункове значення границі міцності $R_b$ , МПа, для сталей марок						
	Ст3		09Г2С, 16ГС		20, 20К	10	10Г2, 17ГС, 09Г2, 17Г1С, 10Г2С1
	Товщина, мм						
	До 20	Понад 20	До 32	Понад 32	До 160		
20	460	380	470	440	410	340	440
100	435	360	425	385	380	310	385
150	460	390	430	430	425	340	430
200	505	420	439	439	460	382	439
250	510	435	444	444	460	400	444
300	520	440	445	445	460	374	445
350	480	420	441	441	430	360	441
375	450	402	425	425	410	330	425

Таблиця А.7. Розрахункові значення умовної границі плинності для теплотривких хромистих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункове значення умовної границі плинності $R_{0,2}$ , МПа, для сталей марок				
	12МХ	12ХМ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	220	220	233	220	400
100	219	219	230	210	352,5
150	218	218	229	207	345
200	217,5	217,5	228	201	337,5
250	217,5	217,5	228	190	330
300	212	212	220	180	315
350	206	206	213	171	300
375	202	202	210	164	270
400	198	198	205	158	255
410	195	195	204	155	240
420	194	194	202	152	225

Таблиця А.8. Розрахункові значення границі міцності для теплотривких хромистих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункові значення границі міцності $R_b$ , МПа, для сталей марок				
	12МХ	12ХМ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	450	450	450	400	600
100	440	440	440	380	572
150	434	434	434	355	555
200	430	430	430	330	535
250	440	437	437	320	520
300	454	445	445	318	503
350	437	442	442	314	492
375	427	436	436	312	484
400	415	426	426	310	472
410	413	424	424	306	468
420	410	421	421	300	462

Таблиця А.9. Розрахункові значення умовної границі плинності  $R_{0,2}$  для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного та аустенітно-феритного класів

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункове значення умовної границі плинності $R_{0,2}$ , МПа, для сталей марок					
	08Х18Г8Н2Т (КО-3)	07Х13АГ20 (ЧС-46)	02Х8Н22С6 (ЭП-794)	5Х18Н12С4ТЮ (ЭИ-654)	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т	06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ
20	350	350	200	350	350	220
100	328	260	160	330	300	207
150	314	230	150	310	290	195
200	300	200	135	300	283	186
250	287	190	125	280	250	175
300	274	180	115	270	240	165
350	—	170	—	—	—	160
375	—	165	—	—	—	157,5
400	—	160	—	—	—	155

Таблиця А.10. Розрахункові значення границі міцності  $R_B$  для жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного та аустенітно-феритного класів

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °C	Розрахункове значення границі міцності $R_B$ , МПа, для сталей марок				
	08X18Г8Н2Т (КО-3)	07X13АГ20 (ЧС-46)	02X8Н22С6 (ЭП-794)	5X18Н12С4ТЮ (ЭИ-654)	06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ
20	600	670	550	700	550
100	535	550	500	640	527,5
150	495	520	480	610	512,5
200	455	490	468	580	500
250	415	485	450	570	490
300	375	480	440	570	482,5
350	—	465	—	—	478
375	—	458	—	—	474
400	—	450	—	—	470

Таблиця А.11. Розрахункові значення умовної границі плинності  $R_{l,0}$  для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного класу

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °C	Розрахункове значення границі плинності $R_{l,0}$ , МПа, для сталей марок				
	12X18H10T, 12X18H12T, 10X17H13M2T	08X18H10T, 08X18H12T, 08X17H13M2T	03X21H21M4ГБ	03X18H11	03X17H14M3
	10X17H13M3T	08X17H15M3T			
20	276	252	270	240	230
100	261	234	260	200	210
150	252	222	257	187,5	195
200	240	210	257	180	180
250	231	198	250	173	170
300	222	184,5	223	168	155
350	216	169,5	215	162	152
375	210	162	212	160	135
400	205,5	154,5	210	160	130
410	204	153	—	160	125
420	202,5	151,5	—	160	123
430	201	150,75	—	160	122
440	199,5	150	—	160	121
450	198	148,5	—	160	120
460	196,5	147	—	—	—
470	195	146	—	—	—
480	193,5	145,5	—	—	—
490	192	144	—	—	—
500	190,5	142,5	—	—	—
510	189	141	—	—	—
520	187,5	139,5	—	—	—
530	186	138	—	—	—



Примітка. Границю плинності за температури 20 °С належить брати:

- для поковок зі сталі марок 12X18H10T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T –  $R_{1,0}^{20}$  (листа) / 1,2;
- для поковок і сортового прокату зі сталі марки 08X18H10T –  $R_{1,0}^{20}$  (листа) / 1,05;
- для сортового прокату зі сталі марок 12X18H10T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T – 1,15  $R_{1,0}^{20}$  (сорт);
- для поковок зі сталі марок 03X17H14M3, 03X18H11 –  $R_{1,0}^{20}$  (листа) / 1,11;
- для сортового прокату зі сталі марки 03X18H11 –  $R_{1,0}^{20}$  (листа) / 1,25;
- для труб зі сталі марки 03X21H21M4ГБ (ЗИ-35) –  $R_{1,0}^{20}$  (листа)/1,14;
- для поковок зі сталі марки 03X21H21M4ГБ (ЗИ-35) – 1,08  $R_{1,0}^{20}$ , де  $R_{1,0}^{20}$  – границя плинності матеріалу поковок визначена за ГОСТ 25054 (за погодженням).

Таблиця А.12. Розрахункові значення границі умовної плинності  $R_{0,2}$  для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного класу

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункове значення границі плинності $R_{0,2}$ , МПа, для сталей марок				
	12X18H10T, 12X18H12T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T	08X18H10T, 08X18H12T, 08X17H13M2T, 08X17H15M3T	03X21H21M4ГБ	03X18H11	03X17H14M3
20	240	210*	250	200	200
100	228	195	240	160	180
150	219	180	235	150	165
200	210	173	235	140	150
250	204	165	232	135	140
300	195	150	205	130	126
350	190	137	199	127	115
375	186	133	195	125	108
400	181	129	191	122,5	100
410	180	128	–	121,5	98
420	180	128	–	121	97,5
430	179	127	–	120,5	97
440	177	126	–	120	96
450	176	125	–	120	95
460	174	125	–	–	–
470	173	124	–	–	–
480	173	123	–	–	–
490	171	122	–	–	–
500	170	122	–	–	–
510	168	120	–	–	–
520	168	119	–	–	–
530	167	119	–	–	–

\* Для сталей 08X17H13M2T, 08X17H15M3T границя плинності за температури 20 °С становить 200 МПа.

*Примітки.* 1. Для поковок із сталі марок 12X18H10T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T границі плинності множать на 0,83.

2. Для сортового прокату із сталі марок 12X18H10T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T границі плинності помножують на  $R_{0,2}^*/240$ , де  $R_{0,2}^*$  – умовна границя плинності матеріалу сортового прокату, визначена за ГОСТ 5949.

3. Для поковок і сортового прокату зі сталі марки 08X18H10T границі плинності помножують на 0,95.

4. Для поковок зі сталі марки 03X17H14M3 границі плинності помножують на 0,9.

5. Для поковок зі сталі марки 03X18H11 границі плинності множать на 0,9; для сортового прокату зі сталі марки 03X18H11 границі плинності помножують на 0,8.

6. Для труб зі сталі марки 03X21H21M4ГБ (ЗІ-35) границі плинності помножують на 0,88.

7. Для поковок зі сталі марки 03X21H21M4ГБ (ЗІ-35) границі плинності помножують на відношення  $R_{0,2}^*/240$ , де  $\sigma_{0,2}^*$  – умовна границя плинності матеріалу поковок, визначена за ГОСТ 25054 (за погодженням).

*Таблиця А.13.* Розрахункові значення границі міцності  $R_g$  для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного класу

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункові значення границі міцності $R_g$ , МПа, для сталей марок					
	03X21H21M4ГБ	08X22H6T, 08X21H6M2T	03X17H14M3	03X18H11	08X18H10T, 08X18H12T, 08X17H13M2T, 08X17H15M3T	12X18H10T, 12X18H12T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T
20	550	600	500	520	520	540
100	540	583	474	450	480	500
150	535	550	453	433	455	475
200	535	515	432	415	430	450
250	534	503	412	405	424	443
300	520	500	392	397	417	440
350	518	—	376	394	408	438
375	517	—	368	392	405	437
400	516	—	360	390	402	436
410	—	—	358	388	400	434
420	—	—	356	386	398	432
430	—	—	354	384	396	431
440	—	—	352	382	394	430
450	—	—	350	380	392	428
460	—	—	—	—	390	426
470	—	—	—	—	388	424
480	—	—	—	—	386	422
490	—	—	—	—	385	421

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункові значення границі міцності $R_{\sigma}$ , МПа, для сталей марок					
	03Х21Н21М4ГБ	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т	03Х17Н14М3	03Х18Н11	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т
500	—	—	—	—	383	420
510	—	—	—	—	381	418
520	—	—	—	—	380	416
530	—	—	—	—	374*	412*

\* Для розрахункової температури стінки 550 °С.

## Додаток Б. Коефіцієнти міцності зварних швів

Таблиця Б.1. Коефіцієнти міцності зварних швів за ГОСТ 14249-89

Вид зварного шва	Значення коефіцієнта міцності зварного шва	
	Довжина швів, що контролюються, становить 100 % від загальної довжини	Довжина швів, що контролюються, становить 10–50 % від загальної довжини
Стиковий або тавровий з двобічним суцільним проваром, що виконується автоматичним або напівавтоматичним зварюванням	1,0	0,9
Стиковий з підварюванням кореня шва або тавровий з двобічним суцільним проваром, що виконується вручну	1,0	0,9
Стиковий, що доступний для зварювання тільки з одного боку і що має у процесі зварювання металеву підкладку з боку кореня шва, коли підкладка прилягає по всій довжині шва до основного металу	0,9	0,8
Тавровий з конструктивним зазором зварюваних деталей	0,8	0,65
Стиковий, що виконується автоматичним і напівавтоматичним зварюванням з одного боку з флюсовою або керамічною підкладкою	0,9	0,8
Стиковий, що виконується вручну з одного боку	0,9	0,65

## Додаток В. Сталевий листовий прокат

Таблиця В.1. Розміри сталевих листових прокатів

Тип прокату	Розміри прокату, мм		
	товщина	ширина	довжина
Прокат листовий гарячекатаний (ГОСТ 19903–74): виготовлений у листах	Від 6 до 26 включно з кроком 0,5; від 27 до 32 включно з кроком 1,0; від 34 до 40 включно з кроком 2,0; 42; 45; 48; 50; 52; 55; 58; 60; 62; 65; 68; 70; 72; 75; 78; 80; 82; 85; 87; 90; 92; 95; від 100 до 160 включно з кроком 5,0 Від 1,2 до 1,6 включно з кроком 0,1;	500 – 1800	1200 – 12000
виготовлений у рулонах	1,8; 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2; 3,5; 3,8; 3,9; 4,0; 4,5; 5,0; 5,3; 5,5; 6,0; 6,3 Від 7,0 до 12 включно з кроком 0,5	500 – 2200	Розвернута довжина рулонів не регламентується
Прокат листовий холоднокатаний (ГОСТ 19904–90): виготовлений у листах	Від 0,35 до 0,80 включно з кроком 0,05; Від 0,90 до 1,80 включно з кроком 0,10; 2,00; 2,20; 2,50; 2,80; 3,00; 3,20; 3,50; 3,80; 3,90; 4,00; 4,20; 4,50; 4,80; 5,00	500 – 2350	1000 – 6000
виготовлений у рулонах	—” —	—” —	Розвернута довжина рулонів не регламентується

Таблиця В.2. Граничні відхилення по товщині прокату листового гарячекатаного [ГОСТ 19903-74]

Товщина прокату	Граничні відхилення по товщині прокату при його ширині, мм									
	Від 500 до 750 включно		Більше 750 до 1000 включно		Більше 1000 до 1500 включно		Більше 1500 до 2000 включно		Більше 2000 до 2300 включно	
	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ
Від 0,40 до 0,50 включно	± 0,05	± 0,07	—	—	—	—	—	—	—	—
Від 0,50 до 0,60 включно	± 0,06	± 0,08	—	—	—	—	—	—	—	—
Від 0,60 до 0,75 включно	± 0,07	± 0,09	± 0,07	± 0,09	—	—	—	—	—	—
Від 0,75 до 0,90 включно	± 0,08	± 0,10	± 0,08	± 0,10	—	—	—	—	—	—
Від 0,90 до 1,10 включно	± 0,09	± 0,11	± 0,09	± 0,12	—	—	—	—	—	—
Від 1,10 до 1,20 включно	± 0,10	± 0,12	± 0,11	± 0,13	± 0,12	± 0,15	—	—	—	—
Від 1,20 до 1,30 включно	± 0,11	± 0,13	± 0,12	± 0,14	± 0,12	± 0,15	—	—	—	—
Від 1,30 до 1,40 включно	± 0,11	± 0,14	± 0,12	± 0,15	± 0,12	± 0,18	—	—	—	—
Від 1,40 до 1,60 включно	± 0,12	± 0,15	± 0,13	± 0,15	± 0,13	± 0,18	—	—	—	—
Від 1,60 до 1,80 включно	± 0,13	± 0,15	± 0,14	± 0,17	± 0,14	± 0,18	—	—	—	—
Від 1,80 до 2,00 включно	± 0,14	± 0,16	± 0,15	± 0,17	± 0,16	± 0,18	± 0,17	± 0,20	—	—
Від 2,00 до 2,20 включно	± 0,15	± 0,17	± 0,16	± 0,18	± 0,17	± 0,19	± 0,18	± 0,20	—	—
Від 2,20 до 2,50 включно	± 0,16	± 0,18	± 0,17	± 0,19	± 0,18	± 0,20	± 0,19	± 0,21	—	—
Від 2,50 до 3,00 включно	± 0,17	± 0,19	± 0,18	± 0,20	± 0,19	± 0,21	± 0,20	± 0,22	± 0,23	± 0,25
Від 3,00 до 3,50 включно	± 0,18	± 0,20	± 0,19	± 0,21	± 0,20	± 0,22	± 0,22	± 0,24	± 0,26	± 0,29
Від 3,50 до 3,90 включно	± 0,20	± 0,22	± 0,21	± 0,23	± 0,22	± 0,24	± 0,24	± 0,26	± 0,28	± 0,31
Від 3,90 до 5,50 включно	+0,10 -0,40	+0,20 -0,40	+0,15 -0,40	+0,30 -0,40	+0,10 -0,50	+0,30 -0,50	+0,20 -0,50	+0,40 -0,50	+0,25 -0,50	+0,45 -0,50
Від 5,50 до 7,50 включно	-0,50	+0,10 -0,50	+0,10 -0,60	+0,20 -0,60	+0,10 -0,60	+0,25 -0,60	+0,20 -0,60	+0,40 -0,60	+0,25 -0,60	+0,45 -0,60

Примітка: ПТ – підвищена точність; НТ – нормальна точність.

Таблиця В.3. Граничні відхилення по товщині прокату листового гарячекатаного, мм [ГОСТ 19903–74]

Товщина прокату	Більше 7,5 до 25,0	Більше 25 до 30	Більше 30 до 34	Більше 34 до 40	Більше 40 до 50	Більше 50 до 60	Більше 60 до 70	Більше 70 до 80	Більше 80 до 90	Більше 90 до 100	Більше 100 до 115	Більше 115 до 125	Більше 125 до 140	Більше 140 до 160
Мінусовий допуск	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,6	2,2	2,5	2,7	3,1	3,5	3,8	4,2

Таблиця В.4. Граничні відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного, мм [ГОСТ 19904–90]

Товщина прокату	Граничні відхилення по товщині прокату при його ширині, мм											
	До 1000 включно			Більше 1000 до 1500 включно			Більше 1500 до 2000 включно			Більше 2000 до 2350 включно		
	ВТ	ПТ	НТ	ВТ	ПТ	НТ	ВТ	ПТ	НТ	ВТ	ПТ	НТ
Від 0,35 до 0,40 включно	± 0,02	± 0,03	± 0,04	± 0,03	± 0,04	± 0,05	–	–	–	–	–	–
Від 0,40 до 0,50 включно	± 0,03	± 0,04	± 0,05	± 0,04	± 0,05	± 0,06	–	–	–	–	–	–
Від 0,50 до 0,65 включно	± 0,04	± 0,05	± 0,06	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,06	± 0,07	± 0,09	–	–	–
Від 0,65 до 0,90 включно	± 0,04	± 0,06	± 0,08	± 0,05	± 0,06	± 0,08	± 0,07	± 0,09	± 0,11	–	–	–
Від 0,90 до 1,20 включно	± 0,05	± 0,08	± 0,10	± 0,06	± 0,09	± 0,11	± 0,07	± 0,10	± 0,13	–	–	–
Від 1,20 до 1,40 включно	± 0,06	± 0,09	± 0,10	± 0,07	± 0,10	± 0,12	± 0,08	± 0,12	± 0,15	–	–	–
Від 1,40 до 1,50 включно	± 0,07	± 0,10	± 0,12	± 0,08	± 0,11	± 0,13	± 0,09	± 0,13	± 0,16	–	–	–
Від 1,50 до 1,80 включно	± 0,08	± 0,12	± 0,14	± 0,09	± 0,12	± 0,15	± 0,10	± 0,14	± 0,17	± 0,14	± 0,17	± 0,21
Від 1,80 до 2,00 включно	± 0,08	± 0,12	± 0,15	± 0,09	± 0,13	± 0,16	± 0,10	± 0,15	± 0,18	± 0,15	± 0,18	± 0,22
Від 2,00 до 2,50 включно	± 0,10	± 0,14	± 0,17	± 0,11	± 0,15	± 0,18	± 0,12	± 0,18	± 0,20	± 0,18	± 0,20	± 0,23
Від 2,50 до 3,00 включно	± 0,12	± 0,16	± 0,18	± 0,13	± 0,16	± 0,19	± 0,14	± 0,19	± 0,22	± 0,19	± 0,21	± 0,25
Від 3,00 до 3,20 включно	± 0,13	± 0,17	± 0,19	± 0,14	± 0,18	± 0,21	± 0,18	± 0,20	± 0,23	± 0,20	± 0,22	± 0,27
Від 3,20 до 4,00 включно	± 0,14	± 0,18	± 0,20	± 0,16	± 0,19	± 0,22	± 0,19	± 0,21	± 0,24	± 0,21	± 0,23	± 0,28
Від 4,00 до 5,00 включно	± 0,16	± 0,19	± 0,20	± 0,18	± 0,20	± 0,23	± 0,20	± 0,22	± 0,25	± 0,23	± 0,25	± 0,30
Примітки: 1) ВТ – висока точність; ПТ – підвищена точність; НТ – нормальна точність. 2) За вимогою споживача допускається виготовлення прокату з мінусовими допустимими граничними відхиленнями, які дорівнюють сумі граничних відхилень.												

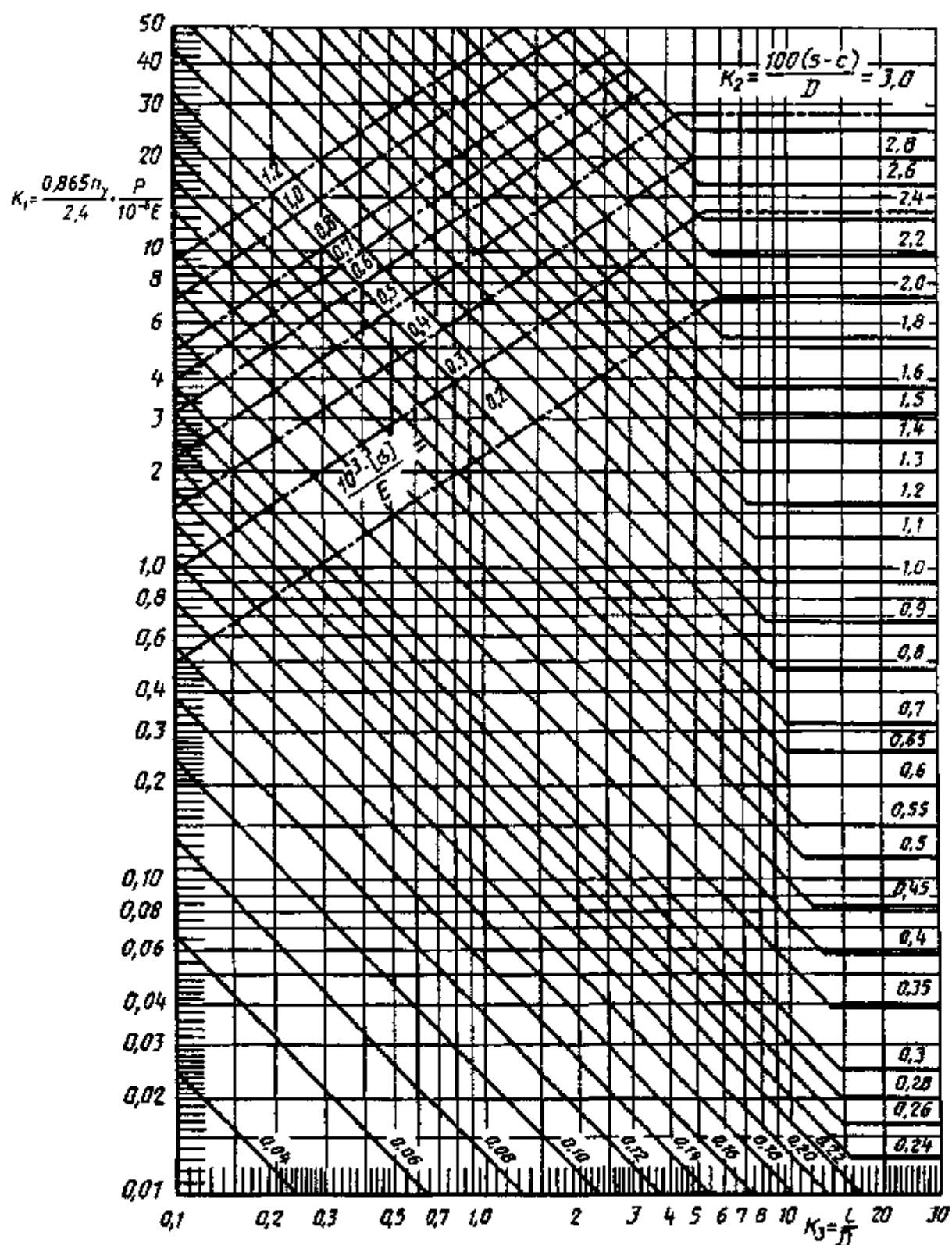
## Додаток Г. Модуль пружності під час розтягу

*Таблиця Г.1. Значення модуля пружності під час розтягу за ГОСТ 14249-89*

Сталь	Модуль пружності під час розтягу $E \cdot 10^{-5}$ , МПа, при температурі, °С													
	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Вуглецеві й низьколеговані сталі	1,99	1,91	1,86	1,81	1,76	1,71	1,64	1,55	1,40	–	–	–	–	–
Теплостійкі й корозієстійкі хромисті сталі	2,15	2,15	2,05	1,98	1,95	1,90	1,84	1,78	1,71	1,63	1,54	1,40	–	–
Жароміцні, жаростійкі й корозієстійкі аустенітні сталі	2,00	2,00	1,99	1,97	1,94	1,90	1,85	1,80	1,74	1,67	1,60	1,52	1,43	1,32



Додаток Д. Номограма для розрахунку на стійкість в границях пружності циліндричних обичайок, які працюють під зовнішнім тиском



**Додаток Е. Додаткові дані для розрахунку затворів  
апаратів високого тиску**

Таблиця Е.1. Орієнтовні розміри ущільнень з двокопусним кільцем, що виготовлені з матеріалу з границею плинності  $\sigma_{T.n}^{20} \geq 300 \text{ МПа}$  [1]

D, м	$h_1 \cdot 10^3$ , м	$h_2 \cdot 10^3$ , м	$b \cdot 10^3$ , м	$\gamma$ , град
0,2	30	15	17	30
0,3	35	18	20	
0,4	45	22	23	
0,5	50	25	26	
0,6	60	30	30	
0,8	70	35	34	
1,0	85	42	40	
1,2	100	50	47	
1,4	115	58	53	
1,6	135	68	61	
1,8	150	75	67	
2,0	165	82	74	
2,2	180	92	82	
2,4	200	100	89	
2,6	220	110	96	
2,8	235	118	103	
3,0	250	125	109	
3,2	270	135	117	

Таблиця Е.2. Розміри ущільнень з кільцем трикутного перерізу, яке виготовлене з матеріалу з границею плинності  $\sigma_{T.n}^{20} \geq 200 \text{ МПа}$  [1]

D, м	$D_R$ , м	$h_0 \cdot 10^3$ , м	$\gamma$ , град	$\gamma_1$ , град
0,2	0,226	13	47	45
0,3	0,328	15		
0,4	0,432	16		
0,5	0,537	18		
0,6	0,637	20		
0,8	0,837	24		
1,0	1.048	26		
1,2	1.248	30		

Таблиця Е.3. Розміри трапецієдальної прокладки [1]

D, м	b, м	h <sub>0</sub> , м	γ <sub>1</sub> , град
Від 0,05 до 0,1	і 0,003	0,005	45
> 0,1 до 0,2	і 0,0045	0,0075	
> 0,2 до 0,4	і 0,006	0,010	
>0,4	і 0,008	0,012	